

Донской государственный технический университет
ДГТУ
Вестник
Донского
государственного
технического
университета
ДГТУ
85
1930-2015
Vestnik of Don State Technical University
Том 15
№ 1 (80)
2015
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ
И НАУЧНО-
ПРАКТИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ
ISSN 1992-5980
DOI 10.12737/issn.1992-5980
МЕХАНИКА
Mechanics
МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
Machine Building and Machine Science
ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
Information Technology, Computer Science and Management
ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ
Processes and Machines of Agro-Engineering Systems
БЕЗОПАСНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА
Safety of Human Activity
science.donstu.ru

ВЕСТНИК
ДОНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
2015
Т. 15, № 1 (80)

Теоретический и научно-практический журнал

Рекомендован ВАК для публикаций основных научных результатов диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук (решение Президиума ВАК Минобрнауки России от 19 февраля 2010 года № 6/6)

Издаётся с 1999 г.

Выходит 4 раза в год
Январь - март 2015 г.

Учредитель — Донской государственный технический университет

Подписано в печать 31.03.2015.
Формат 60×84/8. Гарнитура «Times New Roman» Печать офсетная.
Усл. печ. л. 22,6. Тираж 1000 экз. Заказ № 701 Цена свободная.
Адрес редакции:
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-565.
Адрес полиграфического предприятия:
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-661, 2-738-565.
http://science.donstu.ru
Регистрационное свидетельство ПИ № ФС 77-35012 от 16.01.09.

VESTNIK
of DON STATE TECHNICAL UNIVERSITY 2015

Vol. 15, № 1 (80)

Theoretical and scientific-practical journal

Recommended by the State Commission for Academic Degrees and Titles for publications of the thesis research results for Doctor's and Candidate Degree (the solution of the Presidium of the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Education and Science Ministry, February 19, 2010, № 6/6)

Founded in 1999

4 issues a year

January - March 2015

Founder — Don State Technical University

The issue is prepared by: Inna V. Boyko, Marina P. Smirnova (English version)
Passed for printing 31.03.2015.
Format 60×84/8. Font «Times New Roman». Offset printing.
C.p.sh. 22.6. Circulation 1000 cop. Order 701. Free price.
Editorial Board's address:
Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: +7 (863) 2-738-565
Printery address:
Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: +7 (863) 2-738-661, 2-738-565
http://science.donstu.ru
Registration certificate ПИ № ФС 77-35012 от 16.01.09.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

ДГТУ – 85 лет



История научной школы сельскохозяйственного машиностроения

History of Agricultural Engineering School of Thought

Донской государственный технический университет – это современный, активно развивающийся научно-образовательный центр Юга России, имеющий обширные международные связи. ДГТУ готовит специалистов и выполняет научные исследования в области машиностроения и металлообработки, технологических машин и оборудования, конструирования и надёжности машин, приборостроения и инженерной медицины, робототехники и мехатроники, стандартизации и управления качеством, инженерной защиты окружающей среды и безопасности жизнедеятельности, профессионального образования и психологии, экономики и менеджмента, электроники и системотехники, компьютерной техники и информационных систем.

Одним их важнейших направлений научной деятельности ученых ДГТУ является конструирование и производство сельскохозяйственных машин и технологий.

В разные годы ректорами РИСХМа были И. И. Смирнов, Ю. В. Гриньков, И. А. Долгов.

Don State Technical University is a modern, rapidly developing research and educational centre of the Southern Russia. It has extensive international links. DSTU graduates technicalists and carries out research in the area of mechanical engineering and metal processing, production machinery and equipment, machine construction and reliability, instrument making and engineering medicine, robotics and mechatronics, standardization and quality management, environmental engineering protection and life safety, vocational education and psychology, economics and management, electronics and system engineering, computer equipment and data systems.

One of the primary research lines of the DSTU researchers is agricultural machinery design and technologies.

Over the years, I. I. Smirnov, Y. V. Grinkov, I. A. Dolgov were RIACE rectors.



Иван Иванович Смирнов



Юрий Васильевич Гриньков



Игорь Асонович Долгов

История кафедры «Сельскохозяйственные машины и оборудование» Донского государственного технического университета началась в сентябре 1911 года, когда в Новочеркасском политехническом институте (НПИ) профессор В.Ю. Ган создал «кабинет сельскохозяйственного машиностроения».

History of the Agricultural Machinery and Equipment Department of Don State Technical University started in September, 1911, when the “Cabinet of agricultural engineering” was established by Professor V. Y.Gun in Novocherkassk Polytechnic Institute (NPI).

Необходимость открытия специальности была обусловлена быстрым развитием предприятий сельхозмашиностроения в Ростовской области и сложившимся дефицитом в обеспечении их специалистами по разработке и созданию сельскохозяйственной техники.

В 1930-м году в г. Ростове-на-Дону на базе этой специальности был основан институт сельскохозяйственного машиностроения (РИСХМ), который в 1992-м году был преобразован в Донской государственный технический университет.

С самого начала в РИСХМе активно выполнялись научные и проектно-конструкторские изыскания. Основной направленностью научных исследований в институте являлась проблема конструирования и производства сельскохозяйственных машин, которая стала основой для развития многих научных направлений.

Одним из направлений научно-исследовательской работы являлось конструированние новых сельскохозяйственных машин (первых зерноуборочных комбайнов, культиваторов, тракторных окучников и плугов), разработка и уточнение теории проектирования отдельных рабочих органов сельскохозяйственных машин, различных разделов земледельческой механики.

Значительных вклад в реализации данного направления внесли профессор Н. П. Крутиков, доценты И. И. Смирнов, И. Ф. Попов.

Профессор В. Ю. Ган являлся главным консультантом при проектировании и строительстве завода «Сельмашстроя», профессор Н. П. Крутиков возглавлял работу технического отдела. При участии ученых РИСХМа создан зерноуборочный комбайн «Сталинец-2», удостоенный диплома Гран-при на Международной промышленной выставке в Париже в 1937 году.

В послевоенное время научно-педагогическую базу подготовки специалистов создавали профессора Е. С. Босой, И. Н. Гуров, доценты И. И. Смирнов, И. Ф. Попов, К. Ф. Щербаков, Г. М. Шатуновский, М. Н. Доброхотов. Они одними из первых в стране разработали учебники: «Теория, конструкция и расчет сельскохозяйственных машин», «Машины для уборки технических культур», «Машины для животноводческих ферм», «Машины для уборки и обработки

The opening of this major was caused by the rapid development of the agricultural machinery enterprises in Rostov region, and by the experts gap in the agricultural machinery design and production.

In 1930, this major was used as a base for establishing Rostov Institute of Agricultural Engineering (RIACE). In 1992, RIACE was reorganized into Don State Technical University.

Right from the start, the scientific research and exploratory development have been carried out in RIACE. The scientific investigation mainstream at the Institute for the majority of the departments was the “Problem of agricultural machinery design and production”, and it evolved divergently.

One of the research areas was the creation of new agricultural machinery (first combine harvesters, cultivators, tractor coverers, and ploughs), the development and improvement of the design theory of certain operating devices of the agricultural machinery, of various sections of the agricultural mechanics.

Significant contribution to this area development was made by Professor N. P. Krutikov, assistant professors I. I. Smirnov and I. F. Popov.

Professor V. Y. Gan was the key advisor during the plant engineering and construction, Professor N.P. Krutikov was in charge of the Engineering Department activity of “Selmashstroy”.The RIACE researchers took part in the creation of the combine harvester “Stalinets-2”. This combine harvester was a Grand Prix winner at the International Industrial Exhibition, Paris, in 1937.

In postwar period, an educational research basis for specialist training was created by Professors E.S. Bosoy and I.N. Gurov, assistant professors I.I. Smirnov, I.F. Popov, K.F. Shcherbakov, G.M. Shatunovskiy, M.N. Dobrokhotov. They were among the first national authors of the following training manuals: “Theory, structure and design of agricultural machinery”, “Machines for industrial crops harvesting”, “Machinery for livestock enterprises”,

зерновых культур», «Машины для уборки трав на сено», «Сборка, окраска, заводские испытания и упаковка сельскохозяйственных машин», «Технологичность конструкций и экономическая эффективность сельскохозяйственных машин».

“Machines for cereal crops harvesting and processing”, “Haymaking machines”, “Agricultural machines assembling, painting, shop testing, and packaging”, “Design fabricability and economic efficiency of agricultural machines”.





Крутиков Николай Петрович



Босой Евгений Сергеевич



Верняев Олег Васильевич



Щербаков Константин Федорович

Совместно с конструкторами и технологами завода «Ростсельмаш» реализовано более 200 предложений по улучшению конструкции и технологии изготовления машин. Доцент И.Ф. Попов вместе с работниками завода «Ростсельмаш» был удостоен звания лауреата Государственной премии за разработку конструкции зерноуборочного комбайна «Сталинец-6».

С 1955 года при кафедре «Сельскохозяйственные машины и оборудование» существуют аспирантура и докторантура по специальности 05.20.01 – «Технологии и средства механизации сельского хозяйства».

В РИСХМе с 1969 года работает диссертационный совет (в современной номенклатуре по специальности 05.20.01 – «Технологии и средства механизации сельского хозяйства»). В разные годы его возглавляли профессора И. А. Долгов, Ю. И. Ермольев, В. П. Димитров.

Ученые ДГТУ способствовали созданию и формированию научных направлений кафедр сельхозмашиностроения в нашей стране и за рубежом (АПИ, г. Барнаул; КИСХМ, г. Кишинев; ТашПИ, г. Ташкент; ДТУ, г. Дрезден; НПИ, г. Нанкин, ЧАТУ, г. Челябинск и др.): готовили научные кадры и предоставляли свои методические разработки. Сотрудники кафедры оказывали существенную помощь зарубежным вузам по подготовке кадров для сельхозмашиностроения: читали лекции в ДТУ (г. Дрезден), НПИ (г. Нанкин), ОТУ (г. Ольгин, Куба), г. Нагойя (Япония), г. Вагенинген (Нидерланды), работали по контракту в г. Ёла (Нигерия), г. Чань-Чунь (Китай).

In cooperation with the designers and production engineers of “Rostselmash” plant, over 200 design and production process improvement proposals were implemented. For the development of the combine harvester “Stalinets-6” design, assistant professor I.F. Popov, together with the “Rostselmash” plant workers, was granted the title of laureate of State Prize.

Since 1955, the Agricultural Machinery and Equipment Department has a postgraduate training program and a doctoral program in 05.20.01 “Agriculture Engineering Technologies and Aids”.

Since 1969, the Dissertation Advisory Committee (in current terms, with a specialization in 05.20.01 “Agriculture Engineering Technologies and Aids”) is functioning in DSTU. In different years, it was headed by Professors I. A. Dolgov, Y. I. Yermolyev, V. P. Dimitrov.

The DSTU researchers contributed to the creation and development of the scientific areas of the Agricultural Machinery departments in our country and abroad (API, Barnaul; KISKhM, Kishinev; TashPI, Tashkent; DTU, Drezden; NPI, Nankin; ChATU, Chelyabinsk; etc.): they trained academic staff and provided them with the guidance papers. The Department members rendered every assistance to foreign universities in training staff for the agricultural engineering: they gave lectures at DTU, Drezden; NPI, Nankin; OTU, Olgin, Cuba; Nagoya, Japan; Wageningen, the Netherlands; they held contracts in Yola, Nigeria, and Changchun, China.





Димитров Валерий Петрович



Жаров Виктор Павлович



Ермольев Юрий Иванович



Радин Виктор Викторович

В 70-е – 80-е годы под руководством д.т.н., профессора В. И. Фомина, академика, д.т.н. РАСХН И. А. Долгова, д.т.н., профессора Ю. Ф. Новикова, д.т.н. профессора Н. И. Пройдака были проведены многолетние исследования по изысканию методов переработки растительного сырья в белковые корма, выявлены основные физико-механические закономерности процесса коагуляции зеленого сока, разработаны математические модели, позволяющие адекватно описывать технологические процессы, определять их режимы функционирования.

Эти закономерности являются научной базой для создания ресурсосберегающих экологически чистых технологий производства различных видов кормов и компонентов для комбинированных и искусственных продуктов питания. Совместно с учеными ВНИИкормов и ВНИИКОМЖа была разработана технология и оборудование комплексной переработки листостебельной биомассы однолетних и многолетних сеяных трав в корма и белковые добавки.

Большой вклад в развитие теории и конструкции режущих аппаратов сельхозмашин внёсли профессор Е. С. Босой и его ученики.

Глубокие исследования в области динамики и автоматизации зерноуборочных машин выполнены д.т.н. профессором С. А. Алфёровым, д.т.н., проф. В. П. Жаровым, д.т.н. профессором В. В. Радиным и их учениками.

Под руководством д.т.н., профессора Ю. В. Гринькова, д.т.н., профессора Л. М. Грошева, д.т.н., профессора О. А. Полушкина получило развитие научное направление, связанное с исследованием динамики приводов

In the 1970s-80s, multi-year investigations on the methods of processing vegetable raw materials into the feed protein were carried out, the basic mechanical and physical principles of the green sap coagulation process were identified, the mathematical models that allow an accurate description of the production processes, and the determination of their operation modes were developed under the leadership of Prof. V. Fomin, Dr.Sci. (Eng.); RAAS Academician I. A. Dolgov, Dr.Sci. (Eng.); Prof. Y. F. Novikov, Dr.Sci. (Eng.); Prof. N. I. Proydak, Dr.Sci. (Eng.).

These laws are the research-and-development plant for the creation of the resource-saving environmentally friendly production technologies of various types of feed and components for the combined and artificial foods. In cooperation with the researchers of VNIIkormov and VNIIKOMZh, the technology and equipment for the complex processing of the leafy biomass of annual and perennial cultivated grasses into feed and protein supplements were developed.

Prof. E.S. Bosoy and his disciples did much for the development of the theory and design of the farm machinery cutterbar units.

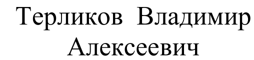
In-depth investigations in dynamics and automation of the grain harvesters were carried out by Prof. S. A. Alferov, Dr.Sci. (Eng.); Prof. V. P. Zharov, Dr.Sci. (Eng.); Prof. V. V. Radin, Dr.Sci. (Eng.), and their disciples.

Prof. Y. V. Grinkov, Dr.Sci. (Eng.); Prof. L. M. Groshev, Dr.Sci. (Eng.); Prof. O. A. Polushkin, Dr.Sci. (Eng.) headed the development of the research area connected with studying the machine drive dynamics, and the a gricultural machinery endurance improvement.

машин, повышением долговечности сельскохозяйственных машин. Результаты проведенных исследований в области снижения вибраций и шума позволили внедрить ряд оригинальных решений в конструкциях зерноуборочных комбайнов Ростсельмаша и Таганрогского комбайнового завода.

The research results in the vibration and noise control allowed applying a number of innovative solutions to the design of “Rostselmash” Plant and Taganrog Combine Plant grain harvesters.





Терликов Владимир Алексеевич



Грошев Леонид Матвеевич



Полушкин Олег Алексеевич



Дьяченко Геннадий Николаевич

Д.т.н., профессором В. А. Терликовым, д.т.н., профессором Л. М. Грошевым были разработаны основы теории расчета рамных и каркасных конструкций сельскохозяйственных машин. Разработанные методы позволили значительно снизить металлоемкость зерноуборочных сельхозмашин.

Под руководством д.т.н., профессора И. А. Хозяева разработаны методологические основы теории надежности человеко-машинных систем. Под руководством д.т.н., профессора А. А. Роя, д.т.н., профессора Г. А. Кузина, д.т.н., профессора Ю. И. Ермольева созданы новые конструкции рабочих органов сельскохозяйственных машин, разработаны методы параметрического и структурного синтеза, обоснованы рациональные подмножества частных технологических операций, формирующих структуры рабочих органов зерноуборочных комбайнов, зерноочистительных машин и агрегатов, реализующих последовательные и фракционные технологии предварительной, первичной и семенной очистки зерна. На основе многолетних исследований, совместно с ОАО ГСКБ «Зерноочистка», разработаны и внедрена в производство зерноочистительные машины различных типов.

Под руководством д.т.н., профессора Г. Н. Дьяченко, д.т.н., профессора О. В. Верняева, д.т.н. И. В. Игнатенко разработаны теоретические основы терраупругости в земледельческой механике; динамические модели взаимодействия рабочих органов машин с почвой.

Prof. V. A. Terlikov, Dr.Sci. (Eng.), and Prof. L. M. Groshev, Dr.Sci. (Eng.), developed the theoretical foundations of the framing structural analysis for the agricultural machinery. The developed methods allowed significantly reduce metal intensity of the grain harvesters.

The methodological foundations of the man-machine systems reliability theory were developed under the leadership of Prof. I. A. Khozyaev, Dr.Sci. (Eng.). New tool designs of the agricultural machinery were created, the parametric and structural synthesis methods were developed, the rational subsets of the local technological operations that form the tool design of the grain harvesters and grain cleaners implementing the consistent and fractional technologies of the preliminary, primary, and seed grain cleaning were proved under the leadership of Prof. A. A. Roy, Dr.Sci. (Eng.), Prof. G. A. Kuzin, Dr.Sci. (Eng.), and Prof. Y. I. Yermolyev, Dr.Sci. (Eng.). Based on the long-time investigations, grain-cleaning machines of various types were developed and implemented in cooperation with OJSC GSKB “Zernoochistka”.

The theoretical foundations of terra-elasticity in the agricultural mechanics, machine tools – soil dynamic interaction models were developed under the leadership of Prof. G. N. Dyachenko, Dr.Sci. (Eng.), Prof. O. V. Vernyaev, Dr.Sci. (Eng.), and Prof. I. V. Ignatenko, Dr.Sci. (Eng.).

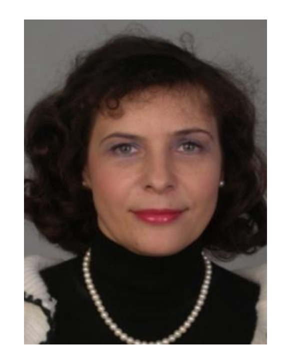
На основе решения задач распределения ресурсов по потребителям в сельскохозяйственном производстве разработан метод синтеза конструктивных параметров рабочих органов при недостатке исходной информации (д.т.н., профессор А. В. Чистяков). Проводятся изыскания и обоснование новых элементов ресурсосберегающих технологий и реализации их в сельскохозяйственных машинах.

On the ground of the task-solution of the consumer resource allocation in the agricultural production, a synthesis method of the tool design parameters considering a raw information gap was developed (Prof. A.V. Chistyakov, Dr.Sci. (Eng.). The investigations and rationale of new elements in the resource-saving technologies and their implementation in the agricultural machinery are carried out.





Кузин Геннадий Александрович



Борисова Людмила Викторовна



Царев Юрий Александрович



Хозяев Игорь Алексеевич

Научные исследования д.т.н., профессора В. П. Димитрова, д.т.н., профессора Л. В. Борисовой, д.т.н., профессора Ю. А. Царева проводятся в области разработки информационных систем управления жизненным циклом сельскохозяйственных машин. Ими впервые разработаны научные основы и создано научное направление по разработке информационных интеллектуальных систем на основе моделей нечетких экспертных знаний при эксплуатации сельхозмашин.

За последние 10 лет разработки в области проектирования и эксплуатации сельскохозяйственных машин награждены 7-ю медалями (4-е золотые, 2-е серебряные, 1 - бронзовая) и 14 дипломами на международных выставках "Интерагромаш" и Международный салон изобретений и новых технологий "Новое время" и др.

В современных условиях ученые ДГТУ ведут исследования по обоснованию новых и модернизации существующих агротехнологий и технических средств для производства и первичной переработки продукции агропромышленного комплекса. Данное направление является одним из актуальных в АПК Российской Федерации.

Prof. V. P. Dimitrov, Dr.Sci. (Eng.), Prof. L. V. Borisova, Dr.Sci. (Eng.), and Prof. Y. A. Tsarev, Dr.Sci. (Eng.), are studying the development of the information management systems of the agricultural machine lifecycle. They are the first to develop the scientific framework and to create a research area of the intelligent information systems designing on the ground of the fuzzy expert knowledge models under the agricultural machine operation.

In the past decade, the development in the agricultural machinery design and operation have been awarded with 7 medals (4 gold, 2 silver, and 1 bronze medals) and 14 diplomas at the “Interagromash” International Exhibitions, the International Salon of Inventions and New Technologies “New Time”, and others.

Under current conditions, the DSTU researchers are studying the foundation of new and modernization of the existing agricultural technologies and equipment for the production and primary processing of the agricultural products. This area is one of the most pressing in the agricultural sector of the Russian Federation.

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 621.9: 531.3 DOI 10.12737/10369

Бифуркации стационарных многообразий, формируемых в окрестности равновесия в динамической системе резания*

В. Л. Заковоротный[1], А. А. Губанова[2], В. В. Христофорова[3]**
[1, 2, 3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Bifurcations of stationary manifolds formed in the neighborhood of equilibrium in the dynamic cutting system***

V. L. Zakovorotny[1], A. A. Gubanova[2], V. V. Khristoforova[3]**
[1, 2, 3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Рассмотрены проблемы нелинейной динамики процесса обработки материалов резанием. Предложена математическая модель динамической системы, учитывающая динамическую связь, формируемую процессом резания. Динамическая подсистема инструмента представлена линейной динамической системой в плоскости, нормальной к поверхности резания. На основе выполненных исследований даются рекомендации по проектированию систем, имеющих требуемые стационарные многообразия в пространстве состояния. Полученные данные позволяют сделать следующие выводы. Динамическая система резания может служить примером сложного поведения, зависящего от параметров подсистемы инструмента и представления сил в координатах состояния. Представление сил в координатах состояния зависит от множества физических процессов, сопровождающих обработку. Важно отметить, что в зависимости от моделей, взаимодействующих через процесс обработки, в окрестности равновесия могут формироваться различные критерии множества, вызывающие регулярные или нерегулярные свойства формируемой при резании поверхности.

Ключевые слова: процесс резания материалов, динамическая система, инвариантные многообразия, бифуркации.

The work objective is to study the formation of orbitally asymptotically stable limit cycles and two-dimensional invariant tori including bifurcations near the attracting sets. The investigators use primarily methods based on the mathematic simulation of the dynamic systems. Some problems of the nonlinear dynamics of the material cutting are considered. A mathematical model of the dynamic system considering the dynamic link formed by the cutting process is offered. Here, the following key features of the dynamic coupling are taken into account: dependence of the cutting forces on the area of a cut-off layer, delay of forces towards the elastic deformation shifts of the tool in relation to the workpiece, restrictions imposed on the tool movements when the back of the instrument is approaching the treated part of the workpiece, forces – cutting velocity relation. The dynamic subsystem of the tool is presented by a linear dynamic system in the plane orthogonal to a cutting surface. Following the research, some guidelines for designing systems with the required stationary manifold in the state space are provided. Importantly, in the neighborhood of equilibrium, various criteria of set causing regular or irregular features of the formed in-cut surface can develop depending on the models interacting under processing.

Keywords: materials cutting, dynamic system, invariant manifold, bifurcations.

Введение. Проблемы динамики процесса резания исследуются в течение последних 50 лет. При этом внимание уделялось, главным образом, двум вопросам: условиям и механизмам возбуждения автоколебаний [1–5] и анализу устойчивости процесса резания [6–10]. Довольно активно изучаются подсистемы инструмента и обрабатываемой заготовки, их взаимодействия через динамическую связь, формируемую процессом резания. Полученные в результате данные служат основой для исследования динамики процесса резания.

Для раскрытия основных свойств динамической системы можно использовать базовую динамическую модель процесса обработки, которая рассматривает упругие деформационные смещения инструмента в плоскости, нормальной к поверхности резания. При этом динамическая связь, формируемая процессом резания, представляет модель сил резания в координатах состояния системы [11–15].

*Работа выполнена по гранту РФФИ № 14-08-00206а «Разработка теории управления процессами обработки на металлорежущих станках на основе синергетической концепции».
**e-mail: vzakovorotny@dstu.edu.ru, anatoliya81@mail.ru, nikaapp@rambler.ru
*** The research is done on RFFI grant no. 14-08-00206a “Development of the machining control theory based on the synergetic concept”.

В данном случае учитываются:

— нелинейная зависимость сил резания от технологических режимов [16–18];

— периодические изменения параметров динамической системы [19–21];

— закономерности формирования новых поверхностей [22–25].

При рассмотрении устойчивости системы с периодически изменяющимися параметрами, а также при формировании новых поверхностей резания используется теория Флоке [22].

В статье развиваются указанные выше представления о динамической системе резания. Основное внимание уделяется вопросам динамической самоорганизации системы, а также ее бифуркациям в параметрическом пространстве. При этом не принимаются во внимание изгибные деформационные смещения инструмента.

Базовая математическая модель. Если не принимать во внимание зависимости сил от координат состояния, то уравнение динамики процесса можно представить в виде [14].

$$m\frac{d^2X}{dt^2}+h\frac{dX}{dt}+cX=F(t), \qquad (1)$$

где $m=\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}$, $h=\begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1} \\ h_{1,2} & h_{2,2} \end{bmatrix}$, $c=\begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{2,1} \\ c_{1,2} & c_{2,2} \end{bmatrix}$ — соответственно матрицы инерционных, диссипативных и упругих коэффициентов подсистемы инструмента; $X=\{X_1,X_2\}^T$ — вектор упругих деформационных смещений инструмента в плоскости, нормальной к поверхности резания; $F(t)=\{F_1(t),F_2(t)\}^T$ — вектор сил резания.

Упругие деформационные смещения рассматриваются в системе координат, двигающейся вдоль заготовки со скоростью движения суппорта V_C. Угловая скорость вращения заготовки считается постоянной. Она определяет постоянную составляющую скорости резания V. Поэтому в установившемся состоянии величина подачи на оборот $S_p=const$.

Сила резания формируется в виде суммы двух составляющих, действующих на переднюю грань инструмента $F^{(1)}$ и на его заднюю грань $F^{(2)}$, то есть $F=F^{(1)}+F^{(2)}$ (рис. 1). При заданной геометрии инструмента технологические режимы (глубина резания t_p и величина подачи на оборот S_p) однозначно определяют ширину срезаемого слоя b и его толщину a, т. к. $a=S_P\sin\varphi$, а $b=t_p/\sin\varphi$ (φ (рис. 1) — главный угол инструмента в плане). Деформационные смещения в направлении, нормальном к плоскости (X_1-X_2), не принимаются во внимание, так как деформации в этом направлении практически не вызывают изменения площади срезаемого слоя S. Кроме того, при точении обычно выполняется соотношение $S_p \langle\langle t_p$.

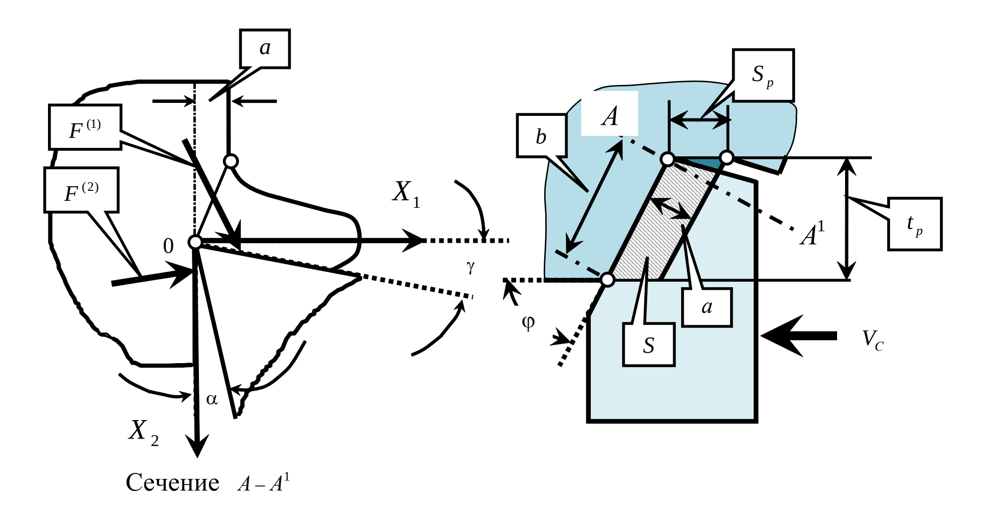


Рис. 1. Ориентация осей деформационных смещений и геометрические соотношения, определяющие формирование площади S срезаемого слоя

Считается, что жесткость подсистемы заготовки на порядок больше, чем жесткость инструмента, поэтому ее деформационными смещениями пренебрегаем. Заметим, что учет упругих деформационных смещений заготовки не представляет сложности. Параметры m, h и c можно определить по правилам, изложенным, например, в [11].

Главная проблема при моделировании динамической системы состоит в представлении $F(t) = \{F_1(t), F_2(t)\}^T$ в координатах состояния. Будем следовать известным взглядам на динамическую связь, формируемую процессом резания. Отдельные элементы этих подходов изложены в выше цитированных работах. В целом, они базируются на следующих особенностях формирования сил резания:

Силы возрастают при увеличении площади срезаемого слоя S;

— существуют запаздывания сил по отношению к вариациям упругих деформационных смещений [3, 6–9];

— они изменяются при варьировании скорости резания [4];

— при сближении задней грани инструмента и обработанной части заготовки имеет место непропорционально быстрое нарастание сил, действующих на заднюю грань инструмента [6, 10];

— существует запаздывание тангенциальных составляющих сил по отношению к их нормальным составляющим.

Кроме этого при моделировании сил используется гипотеза о неизменности ориентации сил в установившемся состоянии. Она определяется:

— для главной составляющей силы $F^{(1)}$ угловыми коэффициентами χ_1 и χ_2;

— для силы, формируемой в области контакта задней грани с обработанной частью поверхности, — угловыми коэффициентами $\chi_1^{(1)}$ и $\chi_2^{(1)}$.

Коэффициенты в основном зависят от переднего угла γ инструмента (угловые коэффициенты χ_1 и χ_2) и от заднего угла (угловые коэффициенты $\chi_1^{(1)}$ и $\chi_2^{(1)}$). Этим свойствам соответствуют следующие представления сил резания в координатах состояния системы:

$$\begin{cases} F_1(X_1, X_2) = \chi_1 \rho \cdot b \cdot [a - y_1] + \chi_1^{(2)} \alpha_1 \{[V + \frac{dX_2}{dt}] - \alpha_2 [V + \frac{dX_2}{dt}]^3\} + \\ + \chi_1^{(1)} F^{(0)} \cdot \exp[-\frac{dX_1/dt}{T_3}]; \\ F_2(X_1, X_2) = \chi_2 \rho \cdot b \cdot [a - y_2] + \chi_2^{(2)} \alpha_1 \{[V + \frac{dX_2}{dt}] - \alpha_2 [V + \frac{dX_2}{dt}]^3\} + \\ + \chi_2^{(1)} F^{(0)} \cdot \exp[-\frac{dX_1/dt}{T_3}]; \\ T_1 \frac{dy_1}{dt} + y_1 = X_1; \\ T_2 \frac{dy_1}{dt} + y_1 = X_1, \end{cases} \tag{2}$$

где a, b — соответственно толщина и ширина срезаемого слоя, мм; T_1, T_2 — постоянные времени, моделирующие запаздывание сил по отношению к деформационным смещениям, с, причем, $T_2 \rangle T_1$; ρ — давление стружки на переднюю грань инструмента в кг/мм^2; $F_1^{(0)}$ — сила резания, действующая на заднюю грань инструмента в состоянии равновесия, кг; T_3 — параметр, определяющий крутизну нарастания силы, действующей на заднюю грань инструмента (зависит от заднего угла инструмента α), мм/с; V — скорость резания; α_1, α_2 — параметры кинетической характеристики процесса резания, определяющие тангенциальную составляющую силы, действующей на заднюю грань инструмента, кг·с/мм и с/мм^2 соответственно.

Здесь зависимость главной составляющей силы резания от скорости аппроксимируется в соответствии с предложениями [4]. Эта составляющая также ориентирована в плоскости с помощью угловых коэффициентов $\chi_1^{(2)}$ и $\chi_2^{(2)}$.

Таким образом, исследованию подлежит следующая система, которая учитывает все отмеченные выше особенности динамической модели процесса резания:

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2X_1}{dt^2}+h_{1,1}\dfrac{dX_1}{dt}+h_{2,1}\dfrac{dX_2}{dt}+c_{1,1}X_1+c_{2,1}X_2=\chi_1\rho\cdot b\cdot(a-y_1)+ \\ +\chi_1^{(1)}F_1^{(0)}\exp(-\dfrac{dX_1/dt}{T_3})+\chi_2^{(1)}\alpha_1[V+\dfrac{dX_2}{dt}-\alpha_2(V+\dfrac{dX_2}{dt})^3]; \\ m\dfrac{d^2X_2}{dt^2}+h_{1,2}\dfrac{dX_1}{dt}+h_{2,2}\dfrac{dX_2}{dt}+c_{1,2}X_1+c_{2,2}X_2= \\ =\chi_2\rho\cdot b\cdot(a-y_2)+\chi_2^{(1)}F_1^{(0)}\exp(-\dfrac{dX_1/dt}{T_3})+\chi_2^{(2)}\alpha_1[V+\dfrac{dX_2}{dt}-\alpha_2(V+\dfrac{dX_2}{dt})^3]; \\ T_1\dfrac{dy_1}{dt}+y_1=X_1; \\ T_2\dfrac{dy_1}{dt}+y_2=X_1. \end{cases} \quad (3)$$

Главная проблема, рассматриваемая в настоящей статье, связана с анализом притягивающих многообразий, которые формируются в окрестности равновесия системы (1), (2). Поэтому вначале рассмотрим свойства равновесия — прежде всего, условия потери его устойчивости.

Свойства равновесия системы. Точка равновесия (X_1^*, X_2^*) определяется из условия $\frac{d^2X}{dt^2}=\frac{dX}{dt}=0$:

$$\begin{cases} (c_{1,1}+\chi_1\rho\cdot b)X_1^*+c_{2,1}X_2^*=\chi_1\rho\cdot b\cdot a+\chi_1^{(1)}F_1^{(0)}+\chi_1^{(2)}\alpha_1[V-\alpha_2(V)^3]; \\ (c_{1,2}+\chi_2\rho\cdot b)X_1^*+c_{2,2}X_2^*=\chi_2\rho\cdot b\cdot a+\chi_2^{(1)}F_1^{(0)}+\chi_2^{(2)}\alpha_1[V-\alpha_2(V)^3]. \end{cases} \quad (4)$$

Система (4) является линейной, и она задает единственную точку равновесия, то есть при изменении параметров и внешних воздействий ветвления точек равновесия не наблюдается. Определение ее устойчивости, как известно [26], основано на линеаризованном в окрестности равновесия уравнении в вариациях относительно (X_1^*, X_2^*) после замены $X_1(t)=X_1^*+x_1(t)$ и $X_2(t)=X_2^*+x_2(t)$. При этом учтем, что при анализе устойчивости точки равновесия $x_1(t)\Rightarrow 0$, $x_2(t)\Rightarrow 0$, $dx_1(t)/dt\Rightarrow 0$, $dx_2(t)/dt\Rightarrow 0$. Тогда при выполнении этих условий справедливо

$$m\frac{d^2x}{dt^2}+h_\Sigma\frac{dx}{dt}+c_\Sigma x=0, \quad (5)$$

где $h_\Sigma=\begin{bmatrix} h_{1,1}-\chi_1\rho bT_1+\chi_1^{(1)}F^{(0)}/T_3 & h_{2,1}-\chi_1^{(2)}\alpha_1 \\ h_{1,2}-\chi_2\rho bT_2+\chi_2^{(1)}F^{(0)}/T_3 & h_{2,2}-\chi_2^{(2)}\alpha_1 \end{bmatrix}$; $c_\Sigma=\begin{bmatrix} c_{1,1}+\chi_1\rho b & c_{2,1} \\ c_{1,2}+\chi_2\rho b & c_{2,2} \end{bmatrix}$; $x=\{x_1,x_2\}^T$ — вектор вариаций упругих деформационных смещений.

Из (5) получаем характеристический полином линеаризованной в окрестности равновесия системы

$$\Delta(p)=\begin{bmatrix} mp^2+(h_{1,1}-\chi_1\rho bT_1+\chi_1^{(1)}F^{(0)}/T_3)p+(c_{1,1}+\chi_1\rho\cdot b) & (h_{2,1}-\chi_1^{(2)}\alpha_1)p+c_{1,1} \\ (h_{1,2}-\chi_2\rho bT_2+\chi_2^{(1)}F^{(0)}/T_3)p+(c_{1,2}+\chi_2\rho\cdot b) & mp^2+(h_{2,2}-\chi_2^{(2)}\alpha_1)p+c_{2,2} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Очевидно, что условия потери устойчивости определяются как свойствами динамической подсистемы инструмента, так и параметрами и моделями представления сил в координатах состояния системы. В частности, если конструктивно обеспечить динамическую систему инструмента ортогональной, то при $h_{2,1}=\chi_1^{(2)}\alpha_1$ система будет устойчивой, если выполнены следующие требования: $h_{1,1}\rangle\chi_1\rho\cdot b\cdot T_1-\chi_1^{(1)}F^{(0)}/T_3$, $h_{2,2}\rangle\chi_2^{(2)}\alpha_1$.

Ранее показано [11], что недиагональные элементы матрицы c зависят от ориентации эллипса жесткости подсистемы инструмента в рассматриваемой плоскости. Этот случай, несмотря на некоторую его условность, подчеркивает, что главные факторы, вызывающие потерю устойчивости, связаны с формированием запаздывающих аргументов в преобразовании деформационных смещений в силы резания. Они указывают также на значение угла наклона скоростной зависимости сил по мере увеличения скорости резания.

В общем же случае главный механизм потери устойчивости при резании связан с образованием ускоряющих сил, которые формируются симметричной составляющей матрицы скоростных коэффициентов. Суммарная матрица

h_Σ в (5) не симметрична. Следовательно, она представима в виде суммы симметричной $h_\Sigma^{(0,C)}$ и кососимметричной $h_\Sigma^{(0,K)}$ составляющих. Из (5) необходимым условием устойчивости является

$$h_\Sigma^{(0,C)} = \begin{bmatrix} [h_{1,1} - \chi_1\rho \cdot b \cdot T_1 + \chi_1^{(1)} F^{(0)} / T_3)] & [h_{1,2} - 0,5(\chi_2\rho \cdot T_2 + \chi_1^{(2)}\alpha_1 - \chi_2^{(1)} F^{(0)} / T_3)] \\ [h_{1,2} - 0,5(\chi_2\rho \cdot T_2 + \chi_1^{(2)}\alpha_1 - \chi_2^{(1)} F^{(0)} / T_3)] & (h_{2,2} - \chi_2^{(2)}\alpha_1) \end{bmatrix} \rangle 0, \quad (7)$$

из которого вытекают все известные условия потери устойчивости.

Преобразованию матрицы $h_\Sigma^{(0,C)}$ из положительно определенной в отрицательно определенную способствует увеличение:

— запаздывающего аргумента T_1;

— коэффициента α_1, определяющего «падающую» характеристику приращения сил при увеличении скорости резания.

В результате система может потерять устойчивость равновесия, так как гироскопические силы, формируемые матрицей

$$h_\Sigma^{(0,K)} = \begin{bmatrix} 0 & 0,5(\chi_2\rho \cdot T_2 + \chi_1^{(2)}\alpha_1 - \chi_2^{(1)} F^{(0)} / T_3) \\ -0,5(\chi_2\rho \cdot T_2 + \chi_1^{(2)}\alpha_1 - \chi_2^{(1)} F^{(0)} / T_3) & 0 \end{bmatrix},$$

не могут стабилизировать равновесие при условии $h_\Sigma^{(0,C)} \langle 0$ [27, 28]. Характеристический полином (6) позволяет в параметрическом пространстве проанализировать области устойчивости. Однако нас в данной работе в основном будут интересовать условия, при которых система теряет равновесие и в его окрестности формируются различные стационарные многообразия. Проанализируем этот вопрос на примере. При этом учтем, что зачастую примеры являются более показательными, чем анализ общего уравнения.

Бифуркации стационарных многообразий в окрестности равновесия. Система (3) моделирует два взаимосвязанных колебательных контура, которые имеют два источника самовозбуждения. Один связан с запаздыванием сил резания по отношению к деформационным смещениям. Второй обусловлен существованием участка вариаций скорости (причина его возникновения — так называемый температурно-скоростной фактор), на котором увеличению скорости соответствует уменьшение сил резания. Поэтому в системе в зависимости от параметров могут существовать три стационарных состояния. Первое — асимптотически устойчивая точка равновесия. Второе — орбитально асимптотически устойчивый предельный цикл. Третье — двумерный инвариантный тор.

Рассмотрим систему, параметры динамической модели инструмента которой приведены в таблице. Достаточно малые значения элементов матрицы жесткости выбраны для того, чтобы увеличить чувствительность формируемых многообразий к изменениям параметров динамической связи в процессе резания. Продольное точение стали 20Х осуществляется четырехгранными неперетачиваемыми пластинками из Т16К6. Основные геометрические параметры инструмента: $\gamma = 6^0$, $\alpha = 2^0$, $\varphi = 45^0$.

Таблица 1

Параметры динамической модели инструмента

m, кг × с^2/мм	h, кг×с/мм	с, кг/мм
$\begin{bmatrix} 0,98\cdot 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0,98\cdot 10^{-3} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 30 & 2,0 \\ 2,0 & 12 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1020 & 25 \\ 25 & 108 \end{bmatrix}$

Частоты системы без взаимного влияния колебательных контуров ($h_{1,2} = h_{2,1} = c_{1,2} = c_{2,1} = 0$) и динамической связи, формируемой процессом резания, соответственно равны: $\omega_{0,1}^{(1)} = 1020\,Гц$, $\omega_{0,2}^{(1)} = 332\,Гц$. Частоты системы с учетом динамической связи, формируемой процессом резания — $\omega_{0,1}^{(2)} = 1540\,Гц$, $\omega_{0,2}^{(2)} = 840\,Гц$. Давление стружки на переднюю поверхность инструмента — $\rho = (450 - 600) кг/мм^2$. Коэффициенты ориентации силы резания в плоскости равны: $\chi_1 = 0,6$, $\chi_2 = 0,8$, $\chi_1^{(1)} = 1$, $\chi_2^{(1)} = 0, \chi_1^{(2)} = 0,8$, $\chi_2^{(2)} = 0,6$. Они удовлетворяют условиям нормировки, например $(\chi_1)^2 + (\chi_2)^2 = 1$.

Чтобы варьировать основные параметры динамической характеристики процесса резания изменялись технологические режимы:

— скорость резания в пределах 60–160 м/мин;

— глубина резания в пределах 0,5–3,0 мм.

Величина подачи на оборот выбрана неизменной и равна 0,1 мм/об. Все параметры идентифицированы по правилам, изложенным в [11].

Проанализируем подробно бифуркационную диаграмму в плоскости двух параметров ($T_3 - \alpha_1$), приведенную на рис. 2.

На этой иллюстрации в качестве примера показаны точки 1, 2, 3, 4, для которых на рис. 3 приведены фазовые траектории в сечениях фазового пространства. Части *а, в, д, ж* рис. 3 соответствуют сечению фазового пространства $X_1, \frac{dx_1}{dt}$. Части *б, г, е, з* — сечению $X_2, \frac{dx_2}{dt}$. Все фазовые траектории сверху вниз соответствуют точкам 1, 2, 3, 4. Также на рис. 2 приведены области *D*-разбиения для линеаризованного в окрестности равновесия уравнения. Они показаны пунктирными кривыми. На участках A — O — D пунктирные кривые совпадают с границами бифуркационной диаграммы, поэтому они сливаются с границами четырех областей *D*-разбиения:

— область, в которой все корни характеристического полинома расположены в отрицательной комплексной полуплоскости (A — O — D);

— области, в которых пара комплексно-сопряженных корней расположена в правой комплексной полуплоскости (A — O — E и F — O — D);

— область, в которой две пары комплексно-сопряженных корней расположены в правой комплексной полуплоскости (E — O — F).

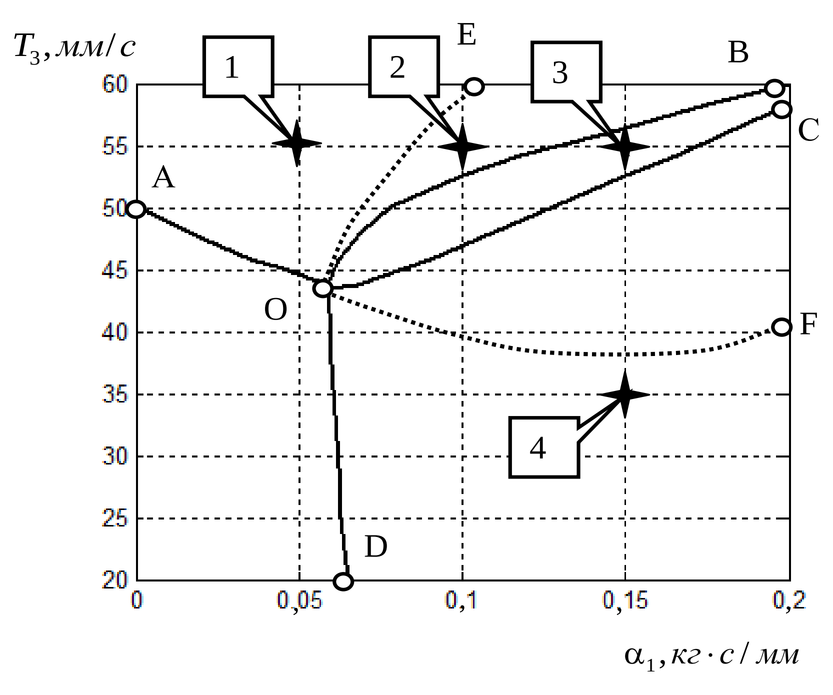


Рис. 2. Бифуркационная диаграмма в плоскости (T_3, α_1):

A— O — D — область устойчивости равновесия; B — O — C — область формирования двумерного инвариантного тора;
A — O — B — область формирования орбитально асимптотически устойчивого предельного цикла на низкой частоте;
C — O — D — область формирования орбитально асимптотически устойчивого предельного цикла на высокой частоте

Как видно, границы областей *D*-разбиения не совпадают с границами бифуркаций инвариантных многообразий в параметрическом пространстве.

Для объяснения этого смещения границы *D*-разбиения и линии бифуркации перехода от предельного цикла к инвариантному тору дальше можно рассмотреть фазовые траектории, соответствующие точке 2 на рис. 2.

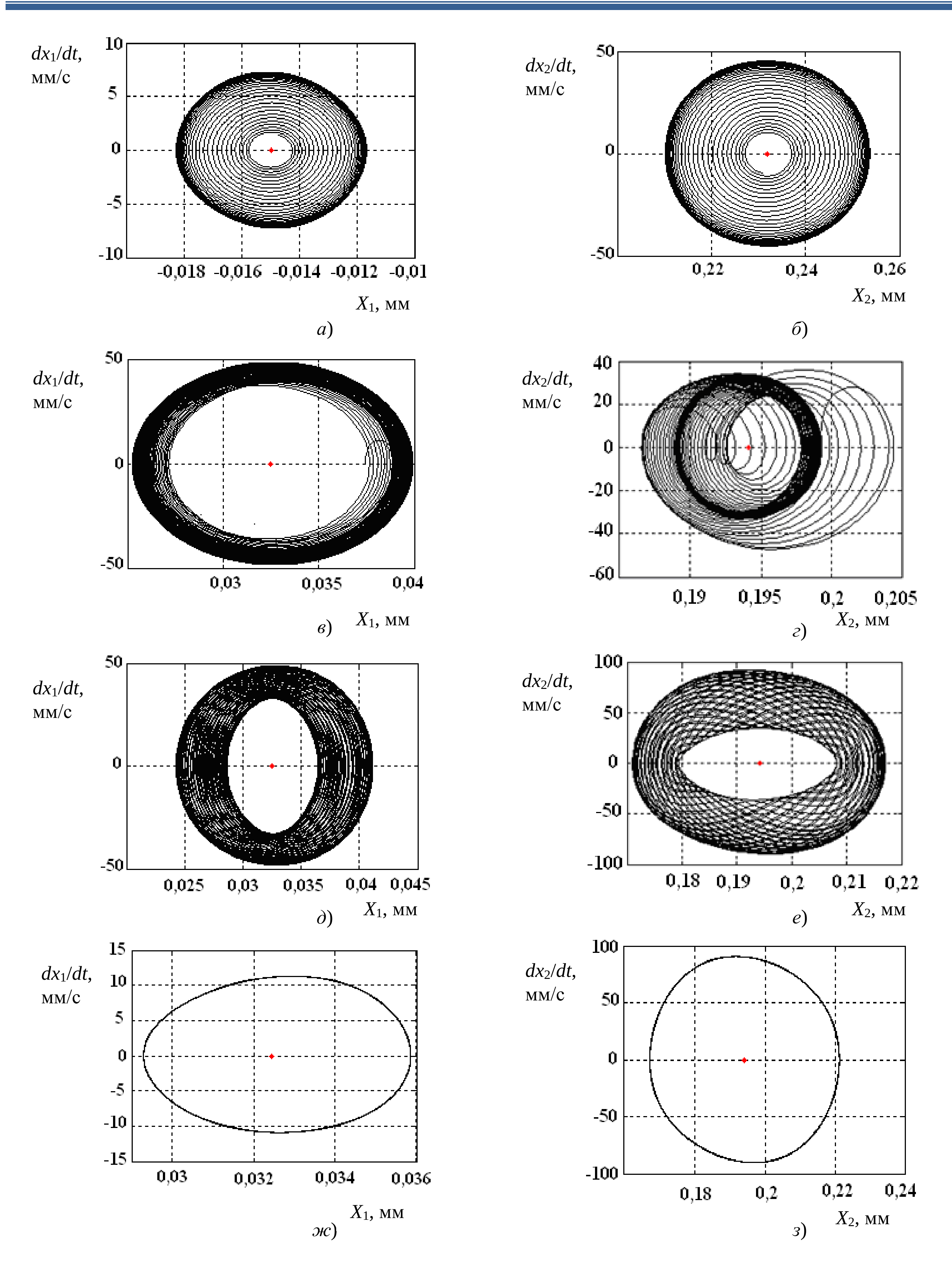


Рис. 3. Фазовые траектории системы, соответствующие четырем точкам на рис. 2: 1 (*а*), (*б*); 2 (*в*), (*г*); 3 (*д*), (*е*); 4 (*ж*), 5 (*з*)

Временные диаграммы для данного случая приведены на рис. 4. Здесь хорошо видно, что двухчастотный процесс с течением времени преобразуется в одночастотный, то есть имеет место затягивание высокочастотных колебаний к низкочастотным. Аналогичная ситуация возникает и в области С — О — F. Однако здесь низкочастотный про-

цесс стягивается к высокочастотному. Эти эффекты связаны с нелинейными диссипативными свойствами системы, которые учитываются в правой части системы (3).

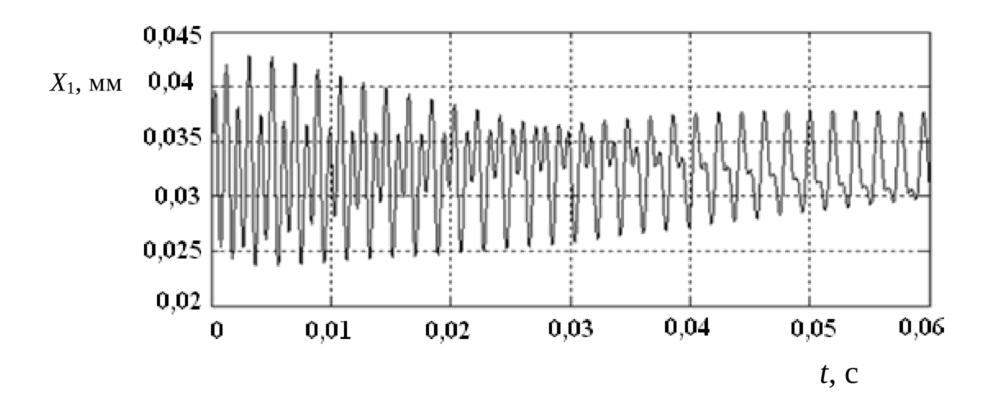


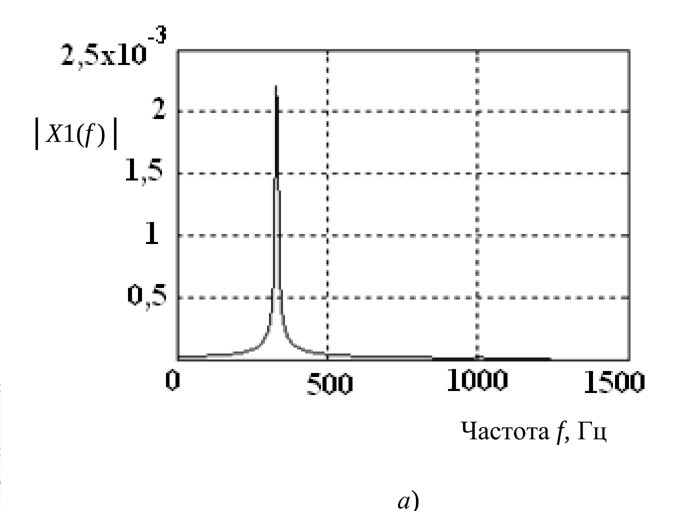
Рис. 4. Пример преобразования двухчастотного процесса в одночастотный, то есть в орбитально асимптотически устойчивый предельный цикл

Приведем также спектральные характеристики колебаний (рис. 5, *а*, *в*, *д*) для точек 2, 3, 4 на рис. 2.

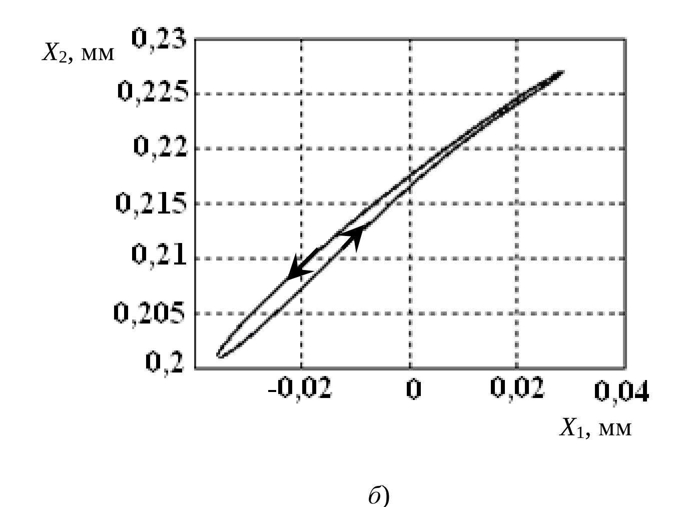
Важно подчеркнуть, что при этом меняется расположение ориентации колебаний в плоскости ($X_1 - X_2$) и их размах в направлении X_1, в котором инструмент оставляет следы на обрабатываемой поверхности (см. рис. 5, *б*, *г*, *е*). При переходе от низкочастотных автоколебаний к высокочастотным размах X_1 соответственно уменьшается с 0,065 мм до 0,006 мм. При этом изменяется ориентация направления колебаний в плоскости ($X_1 - X_2$).

Анализ влияния упруго-диссипативных параметров подсистемы инструмента на формируемые многообразия показывает, что качественно бифуркационная диаграмма остается соответствующей рис. 2. Варьирование параметров матрицы c приводит к смещениям корней характеристического полинома (6) в комплексной плоскости.

При этом корни могут сближаться. В таком случае область, в которой формируется двумерный инвариантный тор, вырождается. На формирование этой области оказывают существенное влияние недиагональные элементы матрицы жесткости. При увеличении прежде всего диагональных элементов матрицы h область устойчивости расширяется. Таким образом, при изменении параметров упругости и диссипации подсистемы инструмента происходят изменения многообразий, формируемых в окрестности равновесия системы.



а)



б)

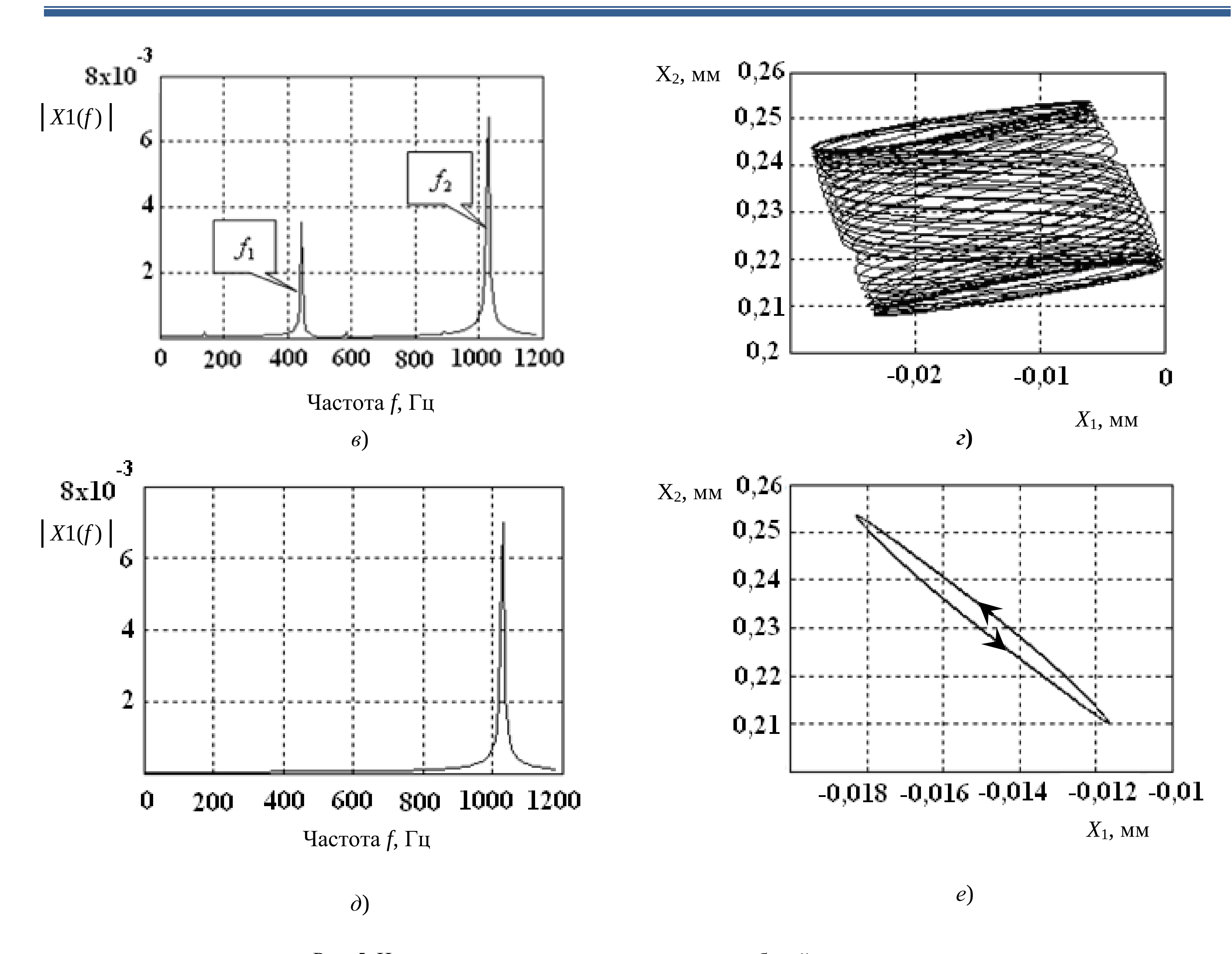


Рис. 5. Изменение спектров установившихся колебаний и их ориентация в плоскости ($X_1 - X_2$) для точек 2 (*а*), (*б*), 3 (*в*), (*г*), 4 (*д*), (*е*) на рис. 2

Заключение. Динамическая система резания, формируемая на основе взаимодействия подсистемы инструмента с динамической связью процесса обработки, является принципиально нелинейной. В окрестности равновесия такой системы, как правило, формируются инвариантные многообразия типа предельного цикла или инвариантного тора. Параметры этих многообразий обусловлены свойствами формируемой динамической связи, зависящей от технологических режимов и от динамических свойств подсистемы инструмента. В свою очередь, известно [6, 29], что, например, стойкость инструмента обусловлена параметрами его автоколебаний. При этом в зависимости от частоты имеет место оптимальное значение автоколебаний, при которых стойкость максимальна. Кроме этого, в зависимости от ориентации параметров автоколебаний в пространстве они могут приводить к уменьшению величины шероховатости формируемой поверхности. Поэтому раскрытие механизмов образования и прогнозирование их параметров открывает путь улучшения процесса резания.

Библиографический список

1. Дроздов, Н. А. К вопросу о вибрациях станка при токарной обработке / Н. А. Дроздов // Станки и инструмент. — 1937. — № 12. — С. 12–17.

2. Каширин, А. И. Исследование вибраций при резании металлов / А. И. Каширин. — Москва ; Ленинград : АН СССР, 1944. — 282 с.

3. Соколовский, А. П. Вибрации при работе на металлорежущих станках / А. П. Соколовский // Исследование колебаний при резании металлов. —Москва : Машгиз, 1958. — С. 15–18.

4. Мурашкин, Л. С. Прикладная нелинейная механика станков / Л. С. Мурашкин, С. Л. Мурашкин. — Ленинград : Машиностроение, 1977. — 192 с.

5. Альбрехт, П. Динамика процесса резания металла / П. Альбрехт // Конструирование и технология машиностроения : тр. Американского общества инженеров-механиков (ASME). —1965. — Т. 87, серия В, № 4.— С. 40–54.

6. Жарков, И. Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И. Г. Жарков. — Ленинград : Машиностроение, 1987. — 184 с.

7. Тлустый, И. Автоколебания в металлорежущих станках / И. Тлустый. — Москва : Машгиз, 1956. — 395 с.

8. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. — Москва : Машиностроение, 1967. —359 с.

9. Эльясберг, М. Е. Автоколебания металлорежущих станков: теория и практика / М. Е. Эльясберг. — Санкт-Петербург : ОКБС, 1993. — 182 с.

10. Вейц, В. Л. Задачи динамики, моделирования и обеспечения качества при механической обработке маложестких заготовок / В. Л. Вейц, Д. В. Васильков // Станки, инструмент. — 1999. — № 6. — С. 9–13.

11. Заковоротный, В. Л. Динамика процесса резания. Синергетический подход / В. Л. Заковоротный, М. Б. Флек // Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2006. — 876 с.

12. Заковоротный, В. Л. Математическое моделирование и параметрическая идентификация динамических свойств подсистемы инструмента и заготовки / В. Л. Заковоротный, Фам Динь Тунг, Нгуен Суан Тьем // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. — 2011. — № 2. — С. 38–46. — (Технические науки).

13. Заковоротный, В. Л. Динамический мониторинг состояния процесса резания / В. Л. Заковоротный, Е. В. Бордачев, М. И. Алексейчик // Станки, инструмент. — 1998. — № 12. — С. 6–12.

14. Заковоротный, В. Л. Моделирование деформационных смещений инструмента относительно заготовки при точении / В. Л. Заковоротный, Фам Динь Тунг, Нгуен Суан Тьем // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2010. — Т. 10, № 7. — С. 1005–1015.

15. Altintas, Y. Analytical prediction of stability lobes in milling / Y. Altintas, E. Budak // CIRP Annals. — 1995. — Vol. 44. — P. 357–362.

16. Balachandran, B. Non-linear dynamics of milling process/ B. Balachandran // Philosophical Transactions of the Royal Society. — 2001. — Vol. 359. — P. 793–820.

17. Davies, M.-A. The stability of low immersion milling / M.-A. Davies, J.-R. Pratt // CIRP Annals. — 2000.— Vol. 49. — P. 37–40.

18. Stability prediction for low radial immersion milling / M.-A. Davies [et al.] // The Journal of Manufacturing Science and Engineering. — 2002. — Vol. 124. — P. 217–225.

19. Prediction of regenerative chatter by modeling and analysis of high-speed milling / R.-P.-H. Faassen [et al.] // The International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2003. — Vol. 43. — P. 1437–1446.

20. Corpus, W.-T. Added stability lobes in machining processes that exhibit periodic time variation. Part 1: An analytical solution / W.-T. Corpus, W.-J. Endres // The Journal of Manufacturing Science and Engineering. — 2004. Vol. 126. — P. 467–474.

21. Floquet, M.-G. Equations diff˝erentielles lin´eaires a coefficients peridiques / M.-G. Floquet // Annales scientifiques de l'École normale supérieure. 1883. — Vol. 12 — P. 47–89.

22. Заковоротный, В. Л. Параметрическое самовозбуждение динамической системы резания / В. Л. Заковоротный, Фам Тхы Хыонг // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2013. — № 5/6 (74/75). — С. 97–104.

23. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays / A. M. Gouskov [et al.] // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. — 2002. — Vol. 7. — P. 207–221.

24. Impact of the cutting dynamics of small radial immersion milling operations on machined surface roughness / G. Peigne [et al.] // The International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2004. — Vol. 44. — P. 1133–1142.

25. Szalai, R. Global dynamics of low immersion high-speed milling / R. Szalai, G. Stepan, S.-J. Hogan // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. — 2004. — Vol. 14. — P. 1069–1077.

26. Меркин, Д. Р. Введение в теорию устойчивости движения / Д. Р. Меркин. — Москва : Наука, 1971.— С. 304.

27. Лихаданов, В. М. О влиянии структуры сил на устойчивость движения / В. М. Лихаданов // Прикладная математика и механика. — 1974. — Т. 38. — С. 246–253.

28. Лихаданов, В. М. О стабилизации потенциальных систем / В. М. Лихаданов // Прикладная математика и механика. — 1975. — Т. 39. — С. 53–58.

29. Остафьев, В. А. Диагностика процесса металлообработки / В. А. Остафьев, В. С. Антонюк, Г. С. Тымчик // Киев : Тэхника, 1991. — С. 54–55.

References

1. Drozdov, N.A. K voprosu o vibratsiyakh stanka pri tokarnoy obrabotke. [On machine vibrations under turning.] Stanki i instrument,1937, no. 12, pp. 12–17 (in Russian).

2. Kashirin, A.I. Issledovanie vibratsiy pri rezanii metallov. [Study on vibrations under metal cutting.] Moscow; Leningrad: AN SSSR, 1944, 282 p. (in Russian).

3. Sokolovskiy, A.P. Vibratsii pri rabote na metallorezhushchikh stankakh. Issledovanie kolebaniy pri rezanii metallov. [Vibrations when operated at machine-tools. Vibration analysis under metal cutting.] Moscow: Mashgiz, 1958, pp. 15–18 (in Russian).

4. Murashkin, L.S., Murashkin, S.L. Prikladnaya nelineynaya mekhanika stankov. [Applied nonlinear tooling mechanics.] Leningrad: Mashinostroenie, 1977, 192 p. (in Russian).

5. Albrecht, P. Dinamika protsessa rezaniya metalla. [Dynamics of Metal-Cutting Process.] Konstruirovanie i tekhnologiya mashinostroeniya: tr. Amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov (ASME). [Construction and Building Design: Proc. Amer. Soc. of Mech. Engineers (ASME).] J. Manuf. Sci. Eng., 1965, vol. 87, iss. 4, pp. 40–54 (in Russian).

6. Zharkov, I.G. Vibratsii pri obrabotke lezviynym instrumentom. [Vibrations under edge tool cutting.] Leningrad: Mashinostroenie, 1987, 184 p. (in Russian).

7. Tlusty, I. Avtokolebaniya v metallorezhushchikh stankakh. [Self-oscillations in machine tools.] Moscow: Mashgiz, 1956, 395 p. (in Russian).

8. Kudinov, V.A. Dinamika stankov. [Dynamics of machines.] Moscow: Mashinostroenie, 1967, 359 p. (in Russian).

9. Elyasberg, M.E. Avtokolebaniya metallorezhushchikh stankov: teoriya i praktika. [Self-oscillations of machine tools: theory and practice.] St. Petersburg: OKBS, 1993, 182 p. (in Russian).

10. Veyts, V.L., Vasilkov, D.V. Zadachi dinamiki, modelirovaniya i obespecheniya kachestva pri mekhanicheskoy obrabotke malozhestkikh zagotovok. [Problems of dynamics, modeling and quality assurance for machining slender workpieces.] Stanki, instrument, 1999, no. 6, pp. 9–13 (in Russian).

11. Zakovorotny, V.L., Flek, M.B. Dinamika protsessa rezaniya. Sinergeticheskiy podkhod. [Dynamics of the cutting process. Synergetic approach.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2006, 876 p. (in Russian).

12. Zakovorotny, V.L., Pham Dinh Tung, Nguyen Xuan Chiem. Matematicheskoe modelirovanie i parametricheskaya identifikatsiya dinamicheskikh svoystv podsistemy instrumenta i zagotovki. [Mathematical simulation and parametric identification of dynamic properties of the tool and workpiece subsystem.] Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Technical Sciences. 2011, no. 2, pp. 38–46 (in Russian).

13. Zakovorotny, V.L., Bordachev, E.V., Alexeychik, M.I. Dinamicheskiy monitoring sostoyaniya protsessa rezaniya. [Dynamic monitoring of the cutting process state.] Stanki, instrument, 1998, no. 12, pp. 6–12 (in Russian).

14. Zakovorotny, V.L., Pham Dinh Tung, Nguyen Xuan Chiem. Modelirovanie deformatsionnykh smeshcheniy instrumenta otnositel'no zagotovki pri tochenii. [Modeling of tool deformation offsetting to workpiece in turning.] Vestnik of DSTU, 2010, vol. 10, no. 7, pp. 1005–1015 (in Russian).

15. Altintas, Y., Budak, E. Analytical prediction of stability lobes in milling. CIRP Annals, 1995, vol. 44, pp. 357–362.

16. Balachandran, B. Non-linear dynamics of milling process. Philosophical Transactions of the Royal Society, 2001, vol. 359, pp. 793–820.

17. Davies, M.-A., Pratt, J.-R. The stability of low immersion milling. CIRP Annals, 2000, vol. 49, pp. 37–40.

18. Davies, M.-A., et al. Stability prediction for low radial immersion milling. The Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2002, vol. 124, pp. 217–225.

19. Faassen, R.-P.-H, et al. Prediction of regenerative chatter by modeling and analysis of high-speed milling. The International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, vol. 43, pp. 1437–1446.

20. Corpus, W.-T., Endre, W.-J. Added stability lobes in machining processes that exhibit periodic time variation. Part 1: An analytical solution. The Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, vol. 126, pp. 467–474.

21. Floquet, M.-G. Equations diff˝erentielles lin´eaires a coefficients peridiques. Annales scientifiques de l'École normale supérieure, 1883, vol. 12, pp. 47–89.

22. Zakovorotny, V.L., Pham Thu Huong. Parametricheskoe samovozbuzhdenie dinamicheskoy sistemy rezaniya. [Parametric self-excitation of cutting dynamic system.] Vestnik of DSTU, 2013, no. 5/6 (74/75), pp. 97–104 (in Russian).

23. Gouskov, A.M., et al. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2002, vol. 7, pp. 207–221.

24. Peigne, G., et al. Impact of the cutting dynamics of small radial immersion milling operations on machined surface roughness. The International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, vol. 44, pp. 1133–1142.

25. Szalai, R., Stepan, G., Hogan, S.-J. Global dynamics of low immersion high-speed milling. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2004, vol. 14, pp. 1069–1077.

26. Merkin, D.R. Vvedenie v teoriyu ustoychivosti dvizheniya. [Introduction to the stability theory.] Moscow: Nauka, 1971, 304 p. (in Russian).

27. Likhadanov, V.M. O vliyanii struktury sil na ustoychivost' dvizheniya. [On effect of force structure on stability of motion.] Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1974, vol. 38, pp. 246–253 (in Russian).

28. Likhadanov, V.M. O stabilizatsii potentsial'nykh sistem. [Stabilization of direct-current systems.] Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1975, vol. 39, pp. 53–58 (in Russian).

29. Ostafyev, V.A., Antonyuk, V.S., Tymchik, G.S. Diagnostika protsessa metalloobrabotki. [Diagnostics of metalworking process.] Kiev: Tekhnika, 1991, pp. 54–55 (in Russian).

Поступила в редакцию 23.09.2014
Сдана в редакцию 25.09.2014
Запланирована в номер 28.01.2015

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 539.3 DOI 10.12737/10371

Сравнение точных решений контактных задач для трансверсально изотропного полупространства*

Д. А. Пожарский[1], Д. Б. Давтян[2]**
[1,2]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Comparison of contact problem exact solutions for transversely isotropic half-space***

D.A. Pozharskiy[1], D.B. Davtyan[2]**
[1,2]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Проведено сравнение точных решений двух контактных задач с неизвестной областью контакта о внедрении эллиптических штампов в трансверсально изотропное упругое полупространство. В первой задаче, названной «традиционной», граница полупространства параллельна плоскостям изотропии. Здесь возможна осевая симметрия для кругового штампа. Во второй задаче, названной «нетрадиционной», граница полупространства перпендикулярна плоскостям изотропии. Здесь осевая симметрия в принципе невозможна: даже для кругового штампа область контакта эллиптическая. Для обеих задач сравнены силы, требуемые для внедрения штампа на заданную величину, и площади возникающих областей контакта. Модель трансверсально изотропного тела применяется для описания многих востребованных в технике и промышленности материалов, параметры упругости которых измерены в последние десятилетия: композиты, керамика, углеволокно, эпоксидный графит, эпоксидное стекло, древесина, состаренные бетоны, некоторые металлы (титан, кобальт, цинк), ряд полупроводников и горных пород.

Ключевые слова: теория упругости, контактные задачи, трансверсально изотропное полупространство, точное решение.

Exact solutions to two contact problems with unknown contact domains on the elliptic punch penetration in the transversely isotropic elastic half-space are compared. In the first one – a “traditional problem” – the half-space boundary is parallel to the isotropy planes. There can be an axial symmetry case for a circular punch. In the second – a “nontraditional problem” – the half-space boundary is perpendicular to the isotropy planes. Here, the axial symmetry is impossible in principle: even for a circular punch, the contact domain will be elliptical. The contact domains and the forces required for the penetration of the punch at a given value are compared for both problems. The transversely isotropic body model is applicable for describing lots of materials which elastic parameters have been measured in recent decades: composites, ceramics, carbon fiber, graphite-epoxy, glass-epoxy, wood, aged concretes, some metals (titanium, cobalt, zinc), some semiconductors and rocks. They are widely used in the engineering and industry.

Keywords: elasticity theory, contact problems, transversely isotropic half-space, exact solution.

Введение. Пионером в области исследования трансверсально изотропных тел считается Эллиот [1, 2]. В контактных задачах теории упругости для трансверсально изотропного полупространства традиционно рассматривался случай, когда область контакта параллельна плоскостям изотропии [3, 4]. Случай, когда область контакта или трещины перпендикулярна плоскостям изотропии, назван «нетрадиционным» [5, 6]. В случае «нетрадиционной» ориентации плоскостей изотропии рассматривались задачи для полосовой, клиновидной, эллиптической и заранее неизвестной областей контакта [7–10].

* Работа выполнена по теме № 1.6.14 в рамках выполнения госзадания Минобрнауки РФ в части НИР.
**e-mail: pozharda@rambler.ru, d_davtyan@bk.ru
*** The research is done on 1.6.14 theme within the frame of the government task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in R&D.

Контактные задачи. Рассмотрим сперва «нетрадиционный» случай контактной задачи о вдавливании эллиптического в плане штампа в трансверсально изотропное полупространство $x \geq 0$, граница которого перпендикулярна плоскостям изотропии z=const (на рис. 1 штамп вдавливается сбоку).

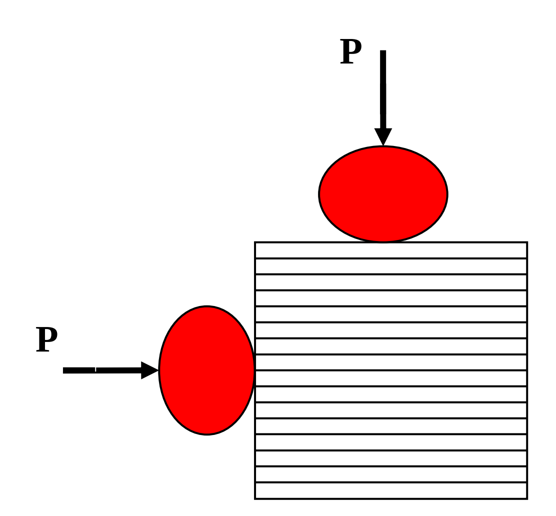


Рис. 1. «Традиционная» и «нетрадиционная» контактные задачи

Пусть основание штампа в области контакта описывается функцией

$$f(y,z) = \frac{y^2}{2R_1} + \frac{z^2}{2R_2}. \quad (1)$$

Штамп вдавливается без перекоса центрально приложенной силой P, испытывая осадку δ. При заданной функции (1) и осадке δ требуется определить область контакта Ω, контактное давление $q(y,z)$ в области Ω и силу P. На основании фундаментального решения [5] интегральное уравнение (ИУ) контактной задачи можно записать в форме

$$\iint\limits_{\Omega} q(y_0,z_0)K(y-y_0,z-z_0)dy_0dz_0 = \delta - f(y,z), \quad (y,z) \in \Omega, \quad (2)$$

$$K(y,z) = \frac{(m_2-m_1)\gamma_3^2}{4\pi^2 A_{66}} \int\limits_{-\infty}^{\infty}\int\limits_{-\infty}^{\infty} \frac{\xi^2}{D}\zeta_1\zeta_2 \exp(-iz\xi - iy\eta)d\xi d\eta,$$

$$D = m_2h_1^2\zeta_2 - m_1h_2^2\zeta_1 - 4(m_2-m_1)\eta^2\zeta_1\zeta_2\zeta_3,$$

$$\zeta_n = \sqrt{\gamma_n^2\xi^2+\eta^2} \quad (n=1,2,3), \quad h_l = (m_l+1)\gamma_3^2\xi^2 + 2\eta^2 \quad (l=1,2).$$

Здесь величины γ_n, m_l зависят от упругих параметров A_{ij} [5], γ_1^2, γ_2^2 являются корнями уравнения

$$\gamma^4 A_{11}A_{44} - \gamma^2[A_{11}A_{33} - A_{13}(A_{13}+2A_{44})] + A_{33}A_{44} = 0, \quad (3)$$

$$\gamma_3^2 = \frac{A_{44}}{A_{66}}, \quad m_1 = \frac{A_{11}\gamma_1^2 - A_{44}}{A_{13}+A_{44}}, \quad m_2 = \frac{A_{11}\gamma_2^2 - A_{44}}{A_{13}+A_{44}}.$$

Для случая (1) точное решение ИУ (2) имеет в вид [5]

$$q(y,z) = q_0\sqrt{1-\frac{y^2}{b^2}-\frac{z^2}{a^2}}, \quad P = \iint\limits_{\Omega} q(y,z)dydz = \frac{2\pi}{3}abq_0, \quad (4)$$

$$\delta = aq_0\frac{(m_1-m_2)\gamma_3^2}{8A_{66}}\int\limits_0^{2\pi}\frac{\zeta_1(\theta)\zeta_2(\theta)\cos^2\theta d\theta}{D(\theta)[(a/b)^2\cos^2\theta + \sin^2\theta]^{1/2}}, \quad (5)$$

$$\frac{b^2}{2R_1} + \frac{a^2}{2R_2} = \delta, \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{c}{d}, \quad (6)$$

$$c = \int_0^{2\pi} \frac{\zeta_1(\theta)\zeta_2(\theta)\cos^4\theta d\theta}{D(\theta)[(a/b)^2\cos^2\theta + \sin^2\theta]^{3/2}},$$

$$d = \int_0^{2\pi} \frac{\zeta_1(\theta)\zeta_2(\theta)\cos^2\theta\sin^2\theta d\theta}{D(\theta)[(a/b)^2\cos^2\theta + \sin^2\theta]^{3/2}},$$

$$\zeta_n(\theta) = \sqrt{\gamma_n^2\cos^2\theta + \sin^2\theta} \quad (n = 1,2,3),$$

$$D(\theta) = m_1 h_2^2(\theta)\zeta_1(\theta) - m_2 h_1^2(\theta)\zeta_2(\theta) - 4(m_1 - m_2)\sin^2\theta\zeta_1(\theta)\zeta_2(\theta)\zeta_3(\theta),$$

$$h_l(\theta) = (m_l + 1)\gamma_3^2\cos^2\theta + 2\sin^2\theta \quad (l = 1,2).$$

При заданных величинах δ, R_1, R_2 отношение полуосей эллипса контакта a/b определяется из второго соотношения (6). Затем величина a находится из первой формулы (6), величина q_0 — из (5). Вдавливающая сила рассчитывается по второй формуле (4).

В традиционном (классическом) случае контактной задачи для трансверсально изотропного полупространства (на рис. 1 штамп вдавливается сверху) ИУ контактной задачи имеет вид (формулы (4.1.24), (7.1.16) в [4])

$$\iint_\Omega \frac{q(x_0, y_0)}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}} dx_0 dy_0 = 2\pi\theta[\delta - f(x,y)], \quad (x,y) \in \Omega, \tag{7}$$

$$\theta = \frac{A_{11}A_{33} - A_{13}^2}{(\gamma_1 + \gamma_2)A_{11}}. \tag{8}$$

Здесь δ — осадка штампа под действием силы P; $f(x,y)$ — функция, описывающая форму основания штампа; Ω — область контакта; $q(x,y)$ — контактное давление в области Ω; γ_1, γ_2 — корни характеристического уравнения (3) (с положительной вещественной частью). Уравнение (7) отличается от ИУ контактной задачи для изотропного полупространства только контактной жесткостью θ. Полагая в формуле (8) (G — модуль сдвига, ν — коэффициент Пуассона)

$$A_{11} = A_{33} = \frac{2G(1-\nu)}{1-2\nu}, \quad A_{13} = \frac{2G\nu}{1-2\nu}, \quad \gamma_1 = \gamma_2 = 1, \tag{9}$$

получим известное выражение контактной жесткости для изотропного случая:

$$\theta = \frac{G}{1-\nu}.$$

Для случая эллиптического параболоида

$$f(x,y) = \frac{x^2}{2R_1} + \frac{y^2}{2R_2}, \quad R_1 \ge R_2, \tag{10}$$

точное решение ИУ (7) выражается через полные эллиптические интегралы

$$K(e) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - e^2\sin^2\varphi}}, \quad E(e) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - e^2\sin^2\varphi}\, d\varphi, \quad D(e) = \frac{K(e) - E(e)}{e^2}$$

и имеет вид [4, с. 210–212], сравните с формулами (4)–(6),

$$q(x,y) = q_0\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}, \quad P = \iint_\Omega q(y,z)dydz = \frac{2\pi}{3}abq_0, \tag{11}$$

$$\delta = \frac{bq_0}{2\theta}K(e), \quad e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}, \tag{12}$$

$$\frac{a^2K(e)}{2R_1D(e)}=\delta,\quad \frac{R_1}{R_2}=\frac{K(e)-E(e)}{(1-e^2)D(e)}. \tag{13}$$

При заданных величинах δ, R_1, R_2 величина e (12) и отношение полуосей эллипса контакта a/b определяются из второго соотношения (13). Затем величина a находится из первой формулы (13), величина q_0 — из первой формулы (12). Вдавливающая сила рассчитывается по второй формуле (11).

Имея решения для двух случаев контактной задачи, изображенных на рис. 1, сравним в этих решениях значения сил, необходимых для вдавливания штампа на одну и ту же величину, а также отношения сил к площади контакта. Допустим, что области контакта находятся в квадратах со стороной h. В «традиционной» контактной задаче введем безразмерные величины (штрихи затем опускаем)

$$x'=\frac{x}{h},\quad y'=\frac{y}{h},\quad \delta'=\frac{\delta}{h},\quad A=\frac{h}{2R_1},\quad B'=\frac{h}{2R_2},\quad a'=\frac{a}{h},\quad b'=\frac{b}{h}, \tag{14}$$

$$q'(x',y')=\frac{q(x,y)}{2\pi\theta},\quad q_0=\frac{q_0}{2\pi\theta},\quad P'=\frac{P}{2\pi\theta h^2} \tag{15}$$

и рассмотрим ниже случай кругового штампа: δ=A=B=1. Тогда на основании формул (11)–(15) безразмерное решение осесимметричной контактной задачи имеет вид

$$q(x,y)=\frac{2\sqrt{2}}{\pi^2}\sqrt{1-2x^2-2y^2},\quad P=\iint\limits_{\Omega}q(x,y)dxdy=\frac{2\sqrt{2}}{3\pi}. \tag{16}$$

В «нетрадиционной» контактной задаче введем безразмерные величины (штрихи затем опускаем)

$$y'=\frac{y}{h},\quad z'=\frac{z}{h},\quad \delta'=\frac{\delta}{h},\quad A=\frac{h}{2R_1},\quad B'=\frac{h}{2R_2},\quad a'=\frac{a}{h},\quad b'=\frac{b}{h}, \tag{17}$$

$$q'(x',y')=\frac{q(x,y)}{A_{66}},\quad q_0'=\frac{q_0}{A_{66}},\quad P'=\frac{P}{A_{66}h^2}. \tag{18}$$

Тогда на основании формул (1), (4)–(6), (17), (18) безразмерное решение имеет вид

$$q(y,z)=q_0\sqrt{1-\frac{y^2}{b^2}-\frac{z^2}{a^2}},\quad P=\iint\limits_{\Omega}q(y,z)dydz=\frac{2\pi}{3}abq_0, \tag{19}$$

$$\delta=aq_0\frac{(m_1-m_2)\gamma_3^2}{8}\int\limits_0^{2\pi}\frac{\zeta_1(\varphi)\zeta_2(\varphi)\cos^2\varphi d\varphi}{D(\varphi)[(a/b)^2\cos^2\varphi+\sin^2\varphi]^{1/2}}, \tag{20}$$

$$Ab^2+Ba^2=\delta,\quad \frac{B}{A}=\frac{c}{d}. \tag{21}$$

Также рассмотрим случай кругового штампа: δ=A=B=1. Из формул (8), (15), (16), (18) и (19) заключаем, что отношение размерной силы $P=P_1$ («традиционный» случай) к размерной силе $P=P_2$ («нетрадиционный» случай) для кругового штампа находится по формуле

$$\frac{P_1}{P_2}=\frac{2\sqrt{2}}{\pi abq_0}\cdot\frac{A_{11}A_{33}-A_{13}^2}{(\gamma_1+\gamma_2)A_{11}A_{66}}, \tag{22}$$

где a, b и q_0 находятся по формулам (20)–(21) при δ=A=B=1.

Важную роль играет отношение $T=P/S$ силы P к площади контакта S. Из формул (16), (19) и (22) заключаем, что для кругового штампа отношение $T=T_1$ для «традиционного» случая связано с отношением $T=T_2$ для «нетрадиционного» случая по формуле

$$\frac{T_1}{T_2}=\frac{4\sqrt{2}}{\pi q_0}\cdot\frac{A_{11}A_{33}-A_{13}^2}{(\gamma_1+\gamma_2)A_{11}A_{66}}, \tag{23}$$

при этом a, b и q_0 находятся по формулам (20)–(21) при δ=A=B=1.

В табл. 1 для ряда материалов приведены результаты расчетов по формулам (20)–(23) при δ=A=B=1.

В [7] введено понятие жесткости поверхности «нетрадиционного» трансверсально изотропного полупространства вдоль осей координат. Анализ данных табл. 1 показывает, что обычно $P_1>P_2$ и $T_1>T_2$, если поверхность материала более жесткая в направлении оси y (исключения: Al_2O_3, SiC, бетон, состаренный циклами нагрев-холод). Кроме того, как правило, $P_1<P_2$ и $T_1<T_2$, если поверхность материала более жесткая в направлении оси z. Изменение площади контакта при изменении направления вдавливания для материалов из табл. 1 незначительно и поэтому отличие отношения T_1/T_2 от отношения вдавливающих сил невелико (см. две последние колонки табл. 1).

Таблица 1

Значения характеристик (безразмерные)

Материал	$\varepsilon=a/b$	a	b	q_0	P_1/P_2	T_1/T_2
Al_2O_3	1,00	0,708	0,706	2,46	1,06	1,06
Co	0,958	0,692	0,722	2,85	1,20	1,20
Mg	0,992	0,704	0,710	2,60	1,04	1,04
SiC	1,02	0,715	0,699	2,10	1,00	1,00
Ti	0,934	0,683	0,731	3,01	1,22	1,21
CdS	0,984	0,701	0,713	2,94	1,10	1,10
GaS	1,32	0,796	0,605	1,81	0,255	0,245
GaSe	1,21	0,771	0,637	1,99	0,381	0,374
ZnO	0,988	0,703	0,712	2,86	1,04	1,04
Углеволокно	0,764	0,607	0,795	3,88	5,60	5,41
Графит	2,09	0,902	0,432	1,71	0,0110	0,00856
Сапфир	1,01	0,710	0,704	2,36	0,992	0,992
Древесина	0,971	0,697	0,717	2,96	1,49	1,49
Керамика PZT-4	1,03	0,719	0,696	2,72	0,852	0,852
Композит (60% волокон)	0,852	0,649	0,761	3,23	4,48	4,42
Бедренная кость человека	0,962	0,693	0,721	3,39	1,20	1,20
Сырая бычья бедренная кость	0,950	0,689	0,725	2,99	1,49	1,49
Эпоксидное стекло	0,940	0,685	0,729	2,73	2,04	2,03
Эпоксидный графит	0,842	0,644	0,765	3,26	4,76	4,69
Гнейс влаго-пропитанный (минерал)	1,09	0,737	0,676	2,42	0,749	0,747
Бетон, состарен химически	0,972	0,697	0,717	2,17	1,17	1,17
Бетон, состарен циклами нагрев-холод	0,972	0,697	0,717	2,35	0,953	0,952

Заключение. Сравнение точных решений пространственных контактных задач для трансверсально изотропного полупространства важно для интерпретации результатов численных решений для конического, пирамидального и др. штампов. С практической точки зрения оба точных решения важны, например, при расчете контактной прочности выработок горных пород.

Библиографический список

1. Elliot, H. A. Three-dimensional stress distributions in hexagonal crystals / H. A. Elliot // Proceedings of Cambridge Philosophical Society. — 1948. — Vol. 44. — P. 522–533.

2. Elliot, H. A. Axial symmetric stress distributions in aeolotropic hexagonal crystals. The problem of plane and related problems / H. A. Elliot // Proceedings of Cambridge Philosophical Society. — 1949. — Vol. 45. — P. 621–630.

3. Грилицкий, Д. В. Осесимметричная контактная задача термоупругости для трансверсально изотропного полупространства / Д. В. Грилицкий, Б. Г. Шелестовский // Прикладная механика. — 1970. — Т. 6, № 8. — С. 3–8.

4. Ding, H. Elasticity of transversely isotropic materials / Haojiang Ding, Weiqiu Chen, L. Zhang. — Dordrecht : Springer, 2006. — 435 p.

5. Fabrikant, V. I. Non-traditional contact problem for transversely isotropic half-space / V. I. Fabrikant // Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics. — 2011. — V. 64, № 2. — P. 151–170.

6. Fabrikant, V. I. Non-traditional crack problem for transversely-isotropic body / V. I. Fabrikant // European Journal of Mechanics A / Solids. — 2011. — Vol. 30. — P. 902–912.

7. Давтян, Д. Б. Действие полосового штампа на трансверсально изотропное полупространство / Д. Б. Давтян, Д. А. Пожарский // Прикладная математика и механика. — 2012. — Т. 76, вып. 5. — С. 783–794.

8. Пожарский, Д. А. Клиновидный штамп на трансверсально изотропном полупространстве / Д. А. Пожарский, Д. Б. Давтян, Е. А. Артамонова // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. — 2013. — № 1. — С. 31–33.

9. Пожарский, Д. А. Трехмерная контактная задача для трансверсально изотропного тела / Д. А. Пожарский, Д. Б. Давтян // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2013. — № 7/8. — С. 22–26.

10. Давтян, Д. Б. Действие эллиптического штампа на трансверсально изотропное полупространство / Д. Б. Давтян, Д. А. Пожарский // Известия РАН. Механика твердого тела. — 2014. — № 5. — С. 117–126.

References

1. Elliot, H.A. Three-dimensional stress distributions in hexagonal crystals. Proceedings of Cambridge Philosophical Society, 1948, vol. 44, pp. 522–533.

2. Elliot, H.A. Axial symmetric stress distributions in aeolotropic hexagonal crystals. The problem of plane and related problems. Proceedings of Cambridge Philosophical Society,1949, vol. 45, pp. 621–630.

3. Grilitskiy, D.V., Shelestovskiy, B.G. Osesimmetrichnaya kontaktnaya zadacha termouprugosti dlya transversal'no izotropnogo poluprostranstva. [The axisymmetric contact problem of thermoelasticity for a transversely isotropic half-space.] Prikladnaya mekhanika, 1973, vol. 6, iss. 8, pp. 3-8 (in Russian).

4. Ding, Haojiang; Chen, Weiqiu; Zhang, L. Elasticity of transversely isotropic materials. Dordrecht : Springer, 2006, 435 p.

5. Fabrikant, V. I. Non-traditional contact problem for transversely isotropic half-space. Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 2011, vol. 64, no. 2, pp. 151–170.

6. Fabrikant, V. I. Non-traditional crack problem for transversely-isotropic body. European Journal of Mechanics - A / Solids, 2011, vol. 30, pp. 902–912.

7. Davtyan, D.B., Pozharskiy, D.A. Deystvie polosovogo shtampa na transversal'no izotropnoe poluprostranstvo. [The action of a strip punch on a transversely isotropic half-space.] Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2012, vol. 76, iss. 5, pp. 783–794 (in Russian).

8. Pozharskiy, D.A., Davtyan, D.B., Artamonova, E.A. Klinovidnyy shtamp na transversal'no izotropnom poluprostranstve. [Wedge-shaped punch on a transversely isotropic half-space.] Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki. 2013, no. 1, pp. 31–33 (in Russian).

9. Pozharskiy, D.A., Davtyan, D.B. Trekhmernaya kontaktnaya zadacha dlya transversal'no izotropnogo tela. [Three-dimensional contact problem for a transversely isotropic solid.] Vestnik of DSTU, 2013, no. 7/8, pp. 22–26 (in Russian).

10. Davtyan, D.B., Pozharskiy, D.A. Deystvie ellipticheskogo shtampa na transversal'no izotropnoe poluprostranstvo. [Action of an elliptic punch on a transversally isotropic half-space.] Mechanics of Solids, 2014, no. 5, pp. 117–126 (in Russian).

Поступила в редакцию 25.10.2014
Сдана в редакцию 06.11.2014
Запланирована в номер 28.01.2015

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 519.8 DOI 10.12737/10372

Моделирование полей упругих деформаций с применением метода точечных источников*

С. Ю. Князев[1], В. Н. Пустовойт[2], Е. Е. Щербакова[3]**
[1,2,3] Донской государственный технический университет, г.Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Modeling the elastic strain fields by point-source method***

S. Y. Knyazev[1], V.N. Pustovoyt[2], E. E. Shcherbakova[3]**
[1,2,3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью работы является исследование эффективности численных моделей полей упругих напряжений в деформированных твердых телах. При построении этих моделей используется метод точечных источников поля (МТИ), называемый в зарубежной литературе также методом фундаментальных решений. Описывается построение системы МТИ при моделировании полей различной физической природы. Вводится понятие точечного источника поля упругих смещений в деформированном твердом теле. Результатом работы является система МТИ, которую возможно использовать для решения различных задач теории упругости, например, для решения классической первой и второй граничных задач теории упругости (на границе заданы либо напряжения, либо смещения), а также смешанной граничной задачи (на одной части границы заданы смещения, а на другой — напряжения). Исследованы свойства МТИ при решении стандартной задачи, задачи Дирихле для круговой области. Найдены зависимости погрешности численного решения от параметров задачи — в частности, от числа зарядов, моделирующих искомое поле, от удаленности зарядов от границ области решения. На основании полученных результатов делается вывод о том, что при численном решении задач теории упругости погрешность МТИ убывает с ростом числа зарядов по экспоненциальному закону. Это свойство численного решения позволяет в определенных случаях получить предельно точное для компьютерных вычислений решение с относительной погрешностью порядка 10^{-15}, что свидетельствует о перспективности использования МТИ при численном решении задач теории упругости.

Ключевые слова: метод точечных источников, метод фундаментальных решений, задача теории упругости, задача Дирихле.

The aim is to study the efficiency of numerical models of elastic stress fields in deformed solids. The field point-source method (PSM) designated as the method of fundamental solutions (MFS) in the foreign literature is used when creating these models. The PSM system construction under simulating fields of different physical nature is described. We introduced the concept of a point-source elastic displacement field in the deformed solid. The research is resulted in the developed PSM equations system that can be used for solving various problems in the elasticity theory including the classical first and second boundary value problems solution in the elasticity theory (when either voltage or bias is specified at the boundary), as well as a mixed boundary problem (when displacement is given on one part of the boundary, and voltage – on the other). The properties of PSM in solving standard problems and the Dirichlet problem for a circular domain are studied. The dependences of the numerical solution error on the problem parameters, in particular, on the number of charges that simulate the desired field, on the remoteness of the charges from the boundaries of the solution domain are found. Based on these results, it is concluded that in the numerical solution of the elasticity problems, PSM error decreases with the growth of the number of charges exponentially. This numerical solution property allows in certain cases obtaining the extremely accurate for computing solution with a relative error of the order of 10^{-15} that implies the PSM application perspectiveness under the numerical solution of elasticity problems.

Keywords: point-source method, method of fundamental solutions, elasticity problem, Dirichlet problem.

Введение. Расчет полей упругих напряжений в деформированных телах является одной из важнейших задач прикладной механики и математики [1–3]. При численном решении этих задач в зависимости от их конкретных особенностей применяют различные численные методы. Довольно часто используются методы конечных разностей (МКР) [4] и граничных элементов (МГЭ) [3]. Однако особое место занимает метод конечных элементов (МКЭ) [2], который по праву можно считать эталоном для численного решения краевых задач математической физики. Тем не менее в ряде

* Работа выполнена по грантам РФФИ 13-07-00952-а и 14-07-00705-а.
** e-mail: ksy@donpac.ru, fipm-dstu@mail.ru, Sherbakovaee@mail.ru
*** The research is done with the support from RFFI (grants 13-07-00952-a, 14-07-00705-a).

случаев, в том числе при моделировании полей упругих напряжений в деформированных твердых телах, использование МКЭ может оказаться неэффективным. Например, МКЭ не всегда обеспечивает требуемую высокую точность результата, особенно в тех случаях, когда необходимо найти производную от искомой функции, вычисление которой производится путем численного дифференцирования, что приводит к резкому увеличению погрешности вычислений. Кроме того, МКЭ может оказаться недостаточно быстродействующим, если необходимо получать решение в режиме реального времени. Таким образом, возникает необходимость поиска численных методов, позволяющих получать более точное решение за более короткий промежуток времени. В этом смысле представляет интерес метод точечных источников поля (МТИ) [5–12]. Он может использоваться для решения широкого круга задач математической физики. Наиболее эффективно использование этого метода при решении краевых задач для уравнений эллиптического типа: уравнений Лапласа, Гельмгольца, бигармонических уравнений [8, 13]. Имеются сведения о возможности и эффективности использования этого метода при решении краевых задач для уравнений параболического типа и для волновых уравнений [8, 14]. В данной статье иллюстрируется возможность применения МТИ при моделировании полей упругих напряжений в деформированных твердых телах. Прежде всего дадим краткое описание МТИ.

Краткое описание МТИ. Пусть в *n*-мерном Евклидовом пространстве задана область *V*, ограниченная поверхностью *S*. В области *V* определено однородное линейное дифференциальное уравнение в частных производных

$$\hat{L}U = 0\,, \tag{1}$$

а на граничной поверхности (на граничном контуре – для двумерного случая) *S* задано условие

$$\hat{l}U\Big|_S = f\,, \tag{2}$$

где $\hat{L}$ и $\hat{l}$ — линейные операторы, *f* — заданная функция, *U* — искомый потенциал поля.

Пусть определена система ϕ_i линейно независимых решений уравнения (1). Тогда приближенное решение граничной задачи (1)–(2) можно искать в виде

$$U(r) \approx \sum_{i=1}^{N} a_i \phi_i(r)\,. \tag{3}$$

Для нахождения неизвестных коэффициентов a_i подставляем (3) в граничное условие (2) и потребуем его выполнения в *N* узловых точках $\mathbf{r}_j$. В результате для нахождения коэффициентов a_i получается система линейных уравнений

$$\sum_{i=1}^{N} a_i \hat{l} \phi_i(r_j) = f(r_j)\,. \tag{4}$$

В качестве системы функций ϕ_i можно использовать фундаментальные решения $\phi_i = \phi(r, R_i)$ уравнения (1), соответствующие точкам R_i, расположенным на вспомогательной замкнутой поверхности S_q, целиком охватывающей *S* и не имеющей с ней (и с *V*) общих точек. В [5] показано, что при выполнении достаточно общих условий система функций $\phi(r, R_i)$ будет обладать свойствами линейной независимости и полноты, поэтому ее можно использовать для нахождения приближенного решения граничной задачи (1)–(2) в виде суммы

$$U_N(r) \approx \sum_{i=1}^{N} q_i \varphi(r, R_i)\,. \tag{5}$$

Фундаментальное решение $f(r, R)$ можно рассматривать (по аналогии с потенциальными электрическими полями) как потенциал поля, созданного в точке r единичным положительным «зарядом», помещенным в точку R, а искомое решение, созданное протяженными, непрерывно распределенными зарядами, представлять в виде суперпозиции полей точечных зарядов. Коэффициенты q_i в (5) при этом можно рассматривать как величины точечных зарядов, расположенных на поверхности S_q. Заряды q_i назовем моделирующими зарядами. Такое физическое истолкование решения граничной задачи способствует удачному выбору вспомогательной поверхности S_q и оптимальному расположению на ней зарядов, что существенно при численном решении. Таким образом, решение краевой задачи сводится к решению системы линейных уравнений

$$\sum_{i=1}^{N} q_i \hat{l} \phi(r_j, R_i) = f(r_j)\,. \tag{6}$$

После решения системы (6), называемой системой МТИ, и нахождения зарядов q_i искомое приближенное решение краевой задачи вычисляется с помощью формулы (5).

В работах [7, 8, 12] показывается, что погрешность МТИ e при решении краевых задач для уравнения Лапласа экспоненциально быстро убывает с ростом числа зарядов, моделирующих искомое поле. Например, для круговой области решения радиусом r_0, если заряды располагаются на вспомогательной окружности радиусом R, то

$$e = E\left(\frac{r_0}{R}\right)^{N/2}. \tag{7}$$

Здесь E — параметр, не зависящий от числа зарядов, моделирующих поле.

Моделирование упругих деформаций. Плоские упругие деформации в изотропных телах определяются вектором деформаций, компоненты которого $U_x(x,y)$ и $U_y(x,y)$, как известно, удовлетворяют системе двух линейных уравнений эллиптического типа [5, 15]:

$$(\lambda+\mu)\frac{\partial\theta}{\partial x}+\mu\Delta U_x = 0,\ (\lambda+\mu)\frac{\partial\theta}{\partial y}+\mu\Delta U_y = 0, \tag{8}$$

где λ и μ — постоянные Ламе,

$$\theta = \frac{\partial U_x}{\partial x}+\frac{\partial U_y}{\partial y}.$$

Пусть на границе S деформированного твердого тела V выполняются граничные условия

$$\alpha_{xx}U_x+\alpha_{xy}U_y+\beta_{xx}\sigma_{nx}+\beta_{xy}\sigma_{ny} = f_x,\ \alpha_{yx}U_x+\alpha_{yy}U_y+\beta_{yx}\sigma_{nx}+\beta_{yy}\sigma_{ny} = f_y. \tag{9}$$

Здесь α, β, f (с соответствующими индексами) — известные функции точки $(x,y)\in V$. σ_{nx}, σ_{ny} — компоненты вектора напряжений; $\sigma_{nx}=\sigma_{xx}\cos(n,x)+\sigma_{xy}\cos(n,y)$, $\sigma_{ny}=\sigma_{yy}\cos(n,y)+\sigma_{yx}\cos(n,x)$; $\cos(n,x)$, $\cos(n,y)$ — направляющие косинусы внешней нормали границы S в данной ее точке.

$$\sigma_{xx}=\lambda\theta+2\mu\frac{\partial U_x}{\partial x},\ \sigma_{yy}=\lambda\theta+2\mu\frac{\partial U_y}{\partial y},\ \sigma_{xy}=\sigma_{yx}=\mu\left(\frac{\partial U_x}{\partial y}+\frac{\partial U_y}{\partial x}\right). \tag{10}$$

Классические первая и вторая граничные задачи теории упругости, когда на границе S заданы либо напряжения, либо смещения, являются частными случаями граничной задачи (8)–(9) при соответствующих значениях параметров α и β.

При моделировании двумерных упругих деформаций используются фундаментальные решения для каждой из двух компонент (x,y) вектора U(r). Причем каждой компоненте соответствуют два типа фундаментальных решений и, следовательно, два типа зарядов, моделирующих поле упругих деформаций. Важнейшим параметром фундаментального решения является также координата точки, в которой располагается заряд, создающий поле упругих деформаций. При решении задач теории упругости с помощью МТИ моделирующие заряды располагаются в узловых точках R_i (с координатами X_i, Y_i; здесь i — номер заряда), расположенных на вспомогательном замкнутом контуре S_q, целиком охватывающем S и не имеющем с ним (и с V) общих точек. Таким образом, фундаментальные решения определяются тремя параметрами: i — номер узловой точки, j — тип фундаментального решения и заряда (1 или 2) и k — тип компоненты смещения (x или y). Эти фундаментальные решения имеют вид

$$\phi_i^{1x}(r) = -n\ln|r-R_i|+\left(\frac{\partial|r-R_i|}{\partial X_i}\right)^2,\ \phi_i^{1y}(r)=\frac{\partial|r-R_i|}{\partial X_i}\frac{\partial|r-R_i|}{\partial Y_i}; \tag{11}$$

$$\phi_i^{2x}(r)=\frac{\partial|r-R_i|}{\partial X_i}\frac{\partial|r-R_i|}{\partial Y_i},\ \phi_i^{2y}(r) = -n\ln|r-R_i|+\left(\frac{\partial|r-R_i|}{\partial Y_i}\right)^2.$$

Здесь $n=(\lambda+3\mu)/(\lambda+\mu)$.

В соответствии с формулами (11) единичный положительный заряд поля смещений первого типа создает в точке своего нахождения бесконечно большое смещение вдоль оси x. При этом в точке, отстоящей от заряда в направлении оси x на единичное расстояние, возникает смещение вдоль оси x единичной величины. Напротив, единичный положительный заряд поля смещений второго типа создает в точке своего нахождения бесконечно большое смещение вдоль оси y. При этом в точке, отстоящей от заряда в направлении оси y на единичное расстояние, возникает смещение вдоль оси y единичной величины.

Полнота системы функций (11), доказанная в [5], позволяет решать граничную задачу (8), (9) с помощью МТИ. Для этого необходимо найти заряды, моделирующие искомое поле упругих напряжений и деформаций путем решения системы МТИ, конкретный вид которой зависит от граничных условий решаемой задачи. Имеются сведения

о применении МТИ к решению задач теории упругости [5]. Однако следует признать, что в настоящее время проблема использования МТИ для моделирования упругих деформаций в твердых телах разработана весьма слабо.

Рассмотрим первую граничную задачу теории упругости, когда на границе S заданы смещения U_x и U_y. Эта задача соответствует частному, простейшему случаю граничных условий (9), которые принимают вид

$$U_x\big|_S = f_x\,,\ U_y\big|_S = f_y\,. \tag{12}$$

Возможны различные варианты построения системы МТИ. Наиболее естественно предположить, что для моделирования упругих деформаций целесообразно использовать одинаковое число N зарядов первого типа q_i^1 (которым соответствуют фундаментальные решения ϕ^{1x} и ϕ^{1y}) и зарядов второго типа q_i^2 (которым соответствуют фундаментальные решения ϕ^{2x} и ϕ^{2y}). Пусть первые N зарядов — заряды первого типа, а последующие N зарядов — заряды второго типа. Учитывая это, в обозначении зарядов можно не указывать их тип, который теперь будет определяться номером заряда.

Положение зарядов, как отмечалось выше, соответствует точкам R_i, расположенным на вспомогательном контуре S_q, целиком охватывающем S. Количество таких точек равно $2N$. Разместим на границе S точки коллокации числом $2N$. В этих точках требуем выполнение граничных условий (12). Теперь систему МТИ (точнее, уравнение системы с номером j) можно записать по аналогии с (6) в виде

$$\sum_{i=1}^{2N} q_i \phi_{ji} = f_j \ \text{ или}$$

$$\sum_{i=1}^{N} q_i \phi_i^{1x}\left(r_j\right) + \sum_{i=N+1}^{2N} q_i \phi_i^{2x}\left(r_j\right) = f_x\left(r_j\right) \ \text{ для } \ j \le N\,; \tag{13}$$

$$\sum_{i=1}^{N} q_i \phi_i^{1y}\left(r_j\right) + \sum_{i=N+1}^{2N} q_i \phi_i^{2y}\left(r_j\right) = f_y\left(r_j\right) \ \text{ для } \ j > N\,.$$

Здесь использованы следующие обозначения:

для $j \le N$ $\quad f_j = f_x\left(\mathbf{r}_j\right)$, $\phi_{ji} = \phi_i^{1x}\left(\mathbf{r}_j\right)$, если $i \le N$, и $\phi_{ji} = \phi_i^{2x}\left(\mathbf{r}_j\right)$, если $i > N$;

для $j > N$ $\quad f_j = f_y\left(\mathbf{r}_j\right)$, $\phi_{ji} = \phi_i^{1y}\left(\mathbf{r}_j\right)$, если $i \le N$, и $\phi_{ji} = \phi_i^{2y}\left(\mathbf{r}_j\right)$, если $i > N$.

После решения системы (13) и нахождения зарядов q_i приближенные значения поля смещений в объеме деформированного тела вычисляются с помощью формул

$$U_x\left(r\right) \approx \sum_{i=1}^{N} q_i \phi_i^{1x}\left(r\right) + \sum_{i=N+1}^{2N} q_i \phi_i^{2x}\left(r\right), \tag{14}$$

$$U_y\left(r\right) \approx \sum_{i=1}^{N} q_i \phi_i^{1y}\left(r\right) + \sum_{i=N+1}^{2N} q_i \phi_i^{2y}\left(r\right).$$

Затем, используя формулы (10), можно вычислить компоненты тензора деформаций. При этом, как отмечалось выше, дополнительной численной ошибки не возникает.

Аналогичным образом решаются вторая граничная задача теории упругости или смешанная граничная задача — когда на одной части границы заданы смещения, а на другой — напряжения. В этом случае вид системы МТИ (13) изменяется.

Решение стандартной задачи МТИ для полей упругих деформаций. Важнейшей задачей исследования численного метода, в том числе и МТИ, является оценка погрешности решения, полученного с помощью этого метода, а также установление зависимости погрешности от параметров задачи, например, от геометрических характеристик области решения, от числа зарядов, моделирующих поле, от их расположения вокруг области решения и т. д. В общем случае получить удовлетворительное решение этой задачи весьма затруднительно. Поэтому исследование данной проблемы начнется с простейших случаев МТИ с последующим усложнением задачи.

В ряде публикаций производится оценка погрешности МТИ при решении задачи Дирихле для круговой области [8–13]. Эту задачу назовем стандартной задачей МТИ. Приведем здесь результаты анализа ее численного решения.

Так как любое поле упругих деформаций, ввиду линейности уравнений (11), обладает свойством суперпозиции, то его можно представить в виде суперпозиции полей точечных источников. Поэтому при исследовании погрешности МТИ важнейшее значение имеет задача нахождения поля, созданного одним точечным зарядом, и оценка погрешности для этого поля.

Пусть искомое поле есть поле смещения, созданное единичным положительным зарядом первого типа, помещенным в точку с радиус-вектором **ρ** и координатами (ρ, 0). Тогда в соответствии с (11) искомое поле будет описываться соотношениями

$$u_x(r) = -n\ln|r-\rho| + \left(\frac{x-\rho}{|r-\rho|}\right)^2,\; u_y(r) = \frac{(x-\rho)y}{|r-\rho|^2}. \tag{15}$$

Область решения представляет собой окружность радиусом $r_0 = 2$. Заряды, моделирующие искомое поле, равномерно располагаются на вспомогательной окружности радиусом R. Количество зарядов каждого типа полагается равным N. Полное число зарядов $N_q = 2N$. Аналогично на границе области решения S, т. е. на окружности радиусом r_0 равномерно располагаются узловые точки, точки коллокации. Полное число зарядов и точек коллокации может не совпадать [8]. Однако здесь применяется наиболее часто используемый и проверенный вариант МТИ, когда каждому заряду на вспомогательной окружности соответствует заряд на границе S. При этом допускается совпадение положения зарядов первого и второго типов и соответствующих им точек коллокации. Здесь при проведении численных экспериментов положения зарядов обоих типов и точек коллокации соответствовали полярным координатам

$$\psi = 2\pi(i-1)/N,\; 1 \le i \le N.$$

Погрешность МТИ в каждой точке области решения граничной задачи определяется величиной

$$\varepsilon(r) = \max\left(|\varepsilon_x(r)|, |\varepsilon_y(r)|\right), \text{ где } \varepsilon_x(r) = U_x(r) - u_x(r),\; \varepsilon_y(r) = U_y(r) - u_y(r).$$

Так как функции $U_x(r), u_x(r), U_y(r), u_y(r)$ удовлетворяют однородным эллиптическим уравнениям (8), то и функции $\varepsilon_x(r), \varepsilon_x(r)$ также удовлетворяют этим уравнениям, а, следовательно, своего максимального и минимального значения достигают на границе S. Поэтому в качестве относительной погрешности МТИ может использоваться величина

$$e = \frac{\varepsilon_{\max}}{u_{\max}}, \tag{16}$$

где $\varepsilon_{\max} = \varepsilon(r)\big|_S$, $u_{\max} = \max\left(|u_x(r)|, |u_y(r)|\right)\big|_S$.

Ниже анализируются результаты численных экспериментов при исследовании погрешности МТИ от различных параметров задачи. На рис. 1 приведены графики зависимости относительной погрешности МТИ e от количества зарядов первого типа N (равного количеству зарядов второго типа). При расчетах полагалось, что искомое поле — это поле точечного заряда первого типа, расположенного на оси x, удаленной от центра области V на расстояние $\rho = 2r_0$. Тонкая сплошная линия на рис. 1 рассчитана при радиусе вспомогательной окружности $R = 1{,}1r_0$. На рис. 1 представлены также зависимости, рассчитанные при $R = 1{,}3r_0$ (жирная сплошная линия) и при $R = 1{,}7r_0$ (пунктирная линия).

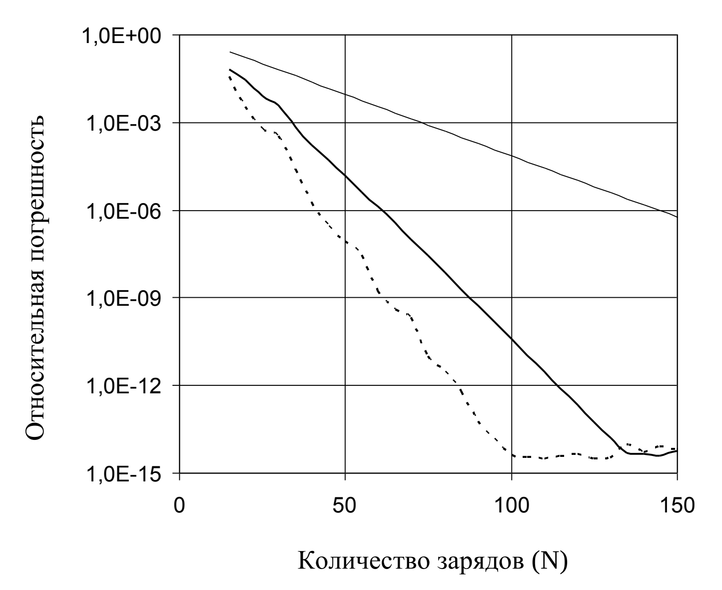


Рис. 1. Зависимость погрешности МТИ от количества зарядов, моделирующих искомое поле для разных значений R

Из рис. 1 видно, что погрешность МТИ убывает с ростом числа зарядов по экспоненциальному закону. Это качественно согласуется с полученной теоретически формулой оценки погрешности МТИ при решении задачи Дирихле для уравнения Лапласа (7). Наблюдается не только качественное, но и некоторое количественное соответствие формуле (7) погрешности данных, представленных на рис. 1. Например, зависимость погрешности от числа зарядов, соответствующая значению $R = 1{,}1r_0$ (тонкая сплошная линия), аппроксимируется формулой $e = 1{,}09\left(\frac{1}{1{,}1}\right)^{1{,}01\frac{N_q}{2}}$. Для значений $R = 1{,}3r_0$ (жирная сплошная линия) и $R = 1{,}7r_0$ (пунктирная линия) это соответствие хотя и в меньшей степени также наблюдается: при $R = 1{,}3r_0$ $e = 2{,}914\left(\frac{1}{1{,}3}\right)^{0{,}964\frac{N_q}{2}}$; при $R = 1{,}3r_0$ $e = 6{,}598\left(\frac{1}{1{,}7}\right)^{0{,}659\frac{N_q}{2}}$. Необходимо, однако, отметить, что количественное согласие с формулой (7) наблюдается только в том случае, если искомое поле создается зарядами, достаточно удаленными от границы S области решения, например на $\rho > 2r_0$. Если поле создается зарядами, расположенными вблизи границы S области решения, то экспоненциальная зависимость погрешности численного решения от числа зарядов N сохраняется, но при этом может измениться коэффициент перед параметром N в показателе степени в формуле (7) с 0,5 на меньшее значение.

Экспоненциально быстрое уменьшение погрешности численного решения с ростом числа зарядов N продолжается до некоторого значения $N = N_{max}$, при котором погрешность МТИ достигает минимального значения e_{min}. При $N > N_{max}$ дальнейшее снижение погрешности прекращается и может смениться медленным ее ростом. Как видно из рис. 1, при $R = 1{,}3r_0$ $N_{max} = 135$ $e_{min} = 5\cdot10^{-15}$; при $R = 1{,}7r_0$ $N_{max} = 100$ $e_{min} = 4\cdot10^{-15}$.

Значения величин e_{min} и (в меньшей степени) N_{max} зависят не только от отношения R/r_0, но и от самого моделируемого поля, в данном случае от величины параметра ρ. Эту особенность численного решения, полученного с помощью МТИ, иллюстрирует рис. 2. На нем представлены графики зависимости относительной погрешности МТИ e от количества зарядов первого типа N, построенные при различных значениях параметра ρ:

— при $\rho = 1{,}2r_0$ (тонкая сплошная линия);
— при $\rho = 1{,}5r_0$ (жирная сплошная линия);
— при $\rho = 2r_0$ (пунктирная линия).

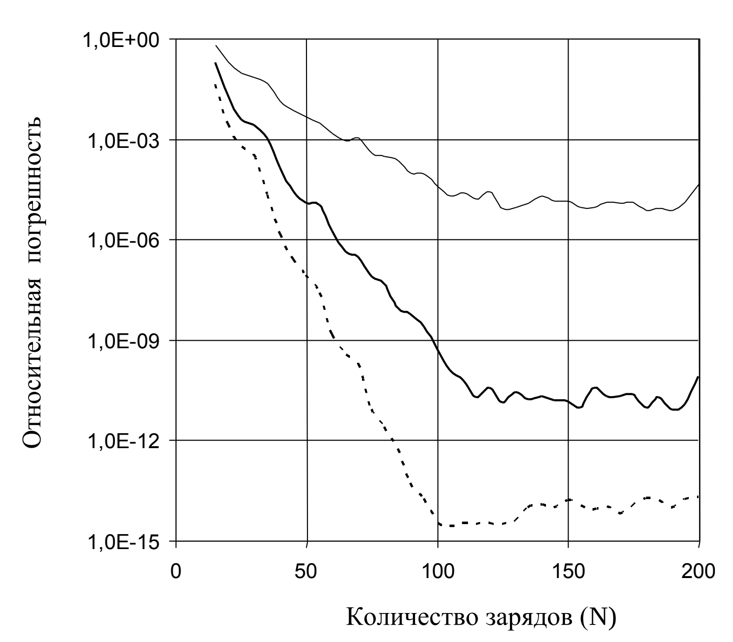


Рис. 2. Зависимость погрешности МТИ от количества зарядов, моделирующих искомое поле, для разных значений ρ

Вычисления проводились при радиусе вспомогательной окружности $R = 1{,}7r_0$. Как видно из рис. 2:

— при $\rho = 1{,}2r_0$ $e_{min} = 7{,}5\cdot10^{-6}$;
— при $\rho = 1{,}5r_0$ $e_{min} = 8\cdot10^{-12}$,
— при $\rho = 2r_0$ $e_{min} = 4\cdot10^{-15}$.

Значения N_{max} при этом близки к 100 и возрастают при переходе от больших ρ к меньшим.

При решении задач теории упругости необходимо учитывать, что одним из основных параметров, определяющих точность численного решения, является удаленность зарядов, моделирующих искомое поле, от границы области решения. В данном случае при решении стандартной задачи МТИ этим параметром является R. На рис. 3 приведены графики зависимости относительной погрешности МТИ e от относительной удаленности зарядов, моделирующих поле, равной $\Delta R = (R - r_0) / r_0$. Зависимости, представленные на рис. 3, получены при $\rho = 2r_0$ и трех различных значениях N:

— при $N = 50$ (тонкая сплошная линия);

— при $N = 75$ (жирная сплошная линия);

— при $N = 125$ (пунктирная линия).

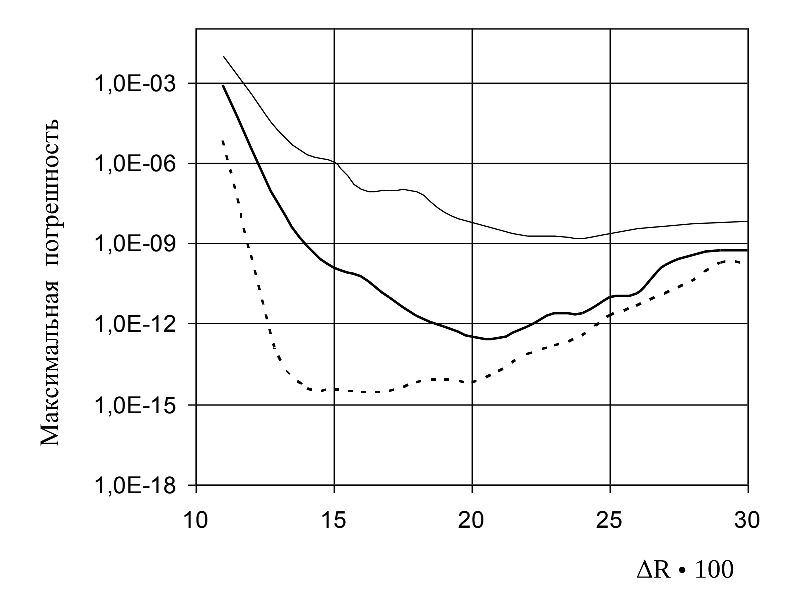


Рис. 3. Зависимость погрешности МТИ от относительной удаленности ΔR зарядов от границы области решения

Из рис. 3 видно, что график зависимости погрешности МТИ от относительной удаленности зарядов, моделирующих искомое поле, от границы области решения представляет собой кривую с минимумом, который наблюдается при относительной удаленности ΔR_{min}, причем при малых ΔR погрешность e убывает с ростом ΔR по экспоненциальному закону. Однако при дальнейшем росте ΔR убывание погрешности замедляется, и при $\Delta R = \Delta R_{min}$ погрешность МТИ достигает минимального значения $e = e_{min}$. При дальнейшем росте ΔR погрешность МТИ медленно возрастает. Значения величин ΔR_{min} и e_{min} зависят от количества N. Чем больше N, тем меньше e_{min} и ΔR_{min}. Эта особенность численного решения задач упругости с помощью МТИ позволяет подбирать оптимальные значения параметров МТИ, обеспечивающие наименьшее значение погрешности решения.

Для МТИ характерно экспоненциально быстрое возрастание числа обусловленности системы МТИ C с ростом размерности системы, т. е. с увеличением числа моделирующих зарядов N [7]. Эту особенность МТИ при решении задач теории упругости иллюстрирует рис. 4, на котором представлены зависимости числа обусловленности системы МТИ с увеличением числа моделирующих зарядов N.

Графики на рис. 4 построены при тех же параметрах МТИ, что и графики на рис. 1, т. е. при $\rho = 2r_0$:

— $R = 1{,}1r_0$ (тонкая сплошная линия);

— $R = 1{,}3r_0$ (жирная сплошная линия);

— $R = 1{,}7r_0$ (пунктирная линия).

Из рис. 4 видно, что число обусловленности системы МТИ C может изменяться в весьма широком интервале — от нескольких единиц до 10^{20} и более. Так как отдельные вычислительные операции не могут быть выполнены на компьютере абсолютно точно, а производятся с относительной погрешностью ε, то при решении системы МТИ возникает относительная погрешность округления

$$e \leq C\varepsilon .$$

Погрешность ε, обусловленная ограниченностью представления вещественных чисел на компьютере, при использовании чисел типа *double* имеет значение порядка 10^{-15}. Это предельная точность вычислений на компьютере. В некоторых случаях при моделировании полей упругих деформаций с помощью МТИ эта предельно высокая точность

вычислений может быть достигнута. Например, как видно из рис. 1, при моделировании поля точечного заряда упругих смещений для $\rho = 2r_0$ предельная точность достигается при $N > 135$ для $R = 1{,}3r_0$ и при $N > 100$ для $R = 1{,}7r_0$. Следует отметить, что такая высокая точность вычислений достигается, несмотря на большие значения чисел обусловленности ($C > 10^{11}$ для $R = 1{,}3r_0$ и $C > 10^{15}$ для $R = 1{,}3r_0$). Такая ситуация является типичной для МТИ. При использовании МТИ точность результата может быть весьма высокой, несмотря на большие значения чисел обусловленности. Более того, весьма часто отмечается следующая особенность [20–22]: чем больше число обусловленности, тем выше точность результата. В ряде публикаций исследуются причины данной закономерности [21]. Тем не менее большие значения чисел обусловленности системы МТИ могут приводить к серьезному снижению точности результата. Именно этим в значительной степени объясняются относительно высокие погрешности при малых ρ (см. рис. 2) и R (см. рис. 3). Этим также объясняется некоторая немонотонность и слабые колебания представленных на рис. 1–3 зависимостей.

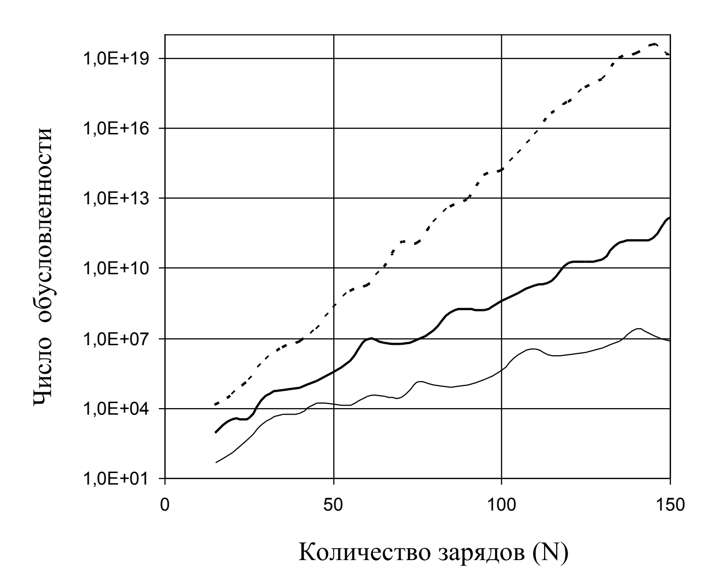


Рис. 4. Зависимость числа обусловленности системы МТИ от количества зарядов, моделирующих искомое поле

Заключение. Проведенные исследования показали принципиальную возможность использования МТИ при моделировании полей упругих деформаций в твердом теле. Исследована зависимость погрешности от параметров системы при решении стандартной задачи МТИ. Полученные результаты качественно (и частично количественно) соответствуют результатам решения задачи Дирихле, а также задачи Неймана и третьей краевой задачи. Это показали дополнительные численные эксперименты.

При практической реализации МТИ необходимо подобрать наиболее эффективное значение удаленности ΔR моделирующих зарядов от границы области решения. Здесь следует учитывать, что чем ближе моделирующие заряды к границе, тем выше погрешность МТИ, но зато меньше число обусловленности системы МТИ и, соответственно, устойчивее решение. Напротив, с удалением моделирующих зарядов от границы области решения точность МТИ повышается, но одновременно увеличивается значение числа обусловленности системы МТИ, что может привести к повышению результирующей погрешности и даже к появлению неустойчивости решения. Наиболее эффективное значение удаленности ΔR можно подобрать в ходе численного эксперимента, начав, например, со значения $\Delta R = 0{,}3r_0$.

Библиографический список

1. Победря, Б. Е. Численные методы в теории упругости и пластичности / Б. Е. Победря. — 2-е изд. — Москва : Издательство МГУ, 1995. — 366 с.

2. Алямовский, А. А. Инженерный анализ методом конечных элементов / А. А. Алямовский. — Москва : ДМК Пресс, 2004. — 426 с.

3. Громадка II, Т. Комплексный метод граничных элементов / Т. Громадка II, Ч. Лей. — Москва : Мир, 1990. — 308 с.

4. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. — Москва : Наука, 1989. — 616 с.

5. Алексидзе, М. А. Фундаментальные функции в приближенных решениях граничных задач / М. А. Алексидзе. — Москва : Наука, 1991. — 352 с.

6. Бахвалов, Ю. А. Математическое моделирование физических полей методом точечных источников / Ю. А. Бахвалов, С. Ю. Князев, А. А. Щербаков // Известия РАН. Серия физическая. — 2008. — Т. 72, № 9. — С. 1259–1261.

7. Князев, С. Ю. Устойчивость и сходимость метода точечных источников поля при численном решении краевых задач для уравнения Лапласа / С. Ю. Князев // Известия вузов. Электромеханика. — 2010. — № 1. — С. 3–12.

8. Fairweather, G. The method of fundamental solutions for elliptic boundary value problems / G. Fairweather, A. Karageorghis // Advances in Computational Mathematics. — 1998. — Vol. 9. — P. 69–95.

9. Golberg, M. A. The method of fundamental solutions for potential problem numerical and mathematical aspects / M. A. Golberg, C. S. Chen // Boundary Integral Methods. Numerical and Mathematical Aspects. — WIT Press : Southampton, 1998. — P. 103–176. — (Computational Mechanics Publications).

10. Chen, J. T. Eigensolutions of multiply connected membranes using the method of fundamental solutions / J.-T. Chen, I.-L. Chen, Y.-T. Lee // Engineering Analysis with Boundary Elements. — 2005. — Vol. 29 (2). — P. 166–174.

11. Golberg, M A. The method of fundamental solutions for Poisson's equation / M. A. Golberg // Engineering Analysis with Boundary Elements. — 1995. — Vol. 16 (3). — P. 205–213.

12. Katsurada, M. The collocation points of the method of fundamental solutions for the potential problem / M. Katsurada, H. Okamoto // Computers & Mathematics with Applications. — 1996. — Vol. 31. — P. 123–137.

13. Князев, С. Ю. Решение граничных задач математической физики методом точечных источников поля / С. Ю. Князев, Е. Е. Щербакова // Известия вузов. Электромеханика. — 2007. — № 3. — С. 11–15.

14. Князев, С. Ю. Решение задач тепло- и массопереноса с помощью метода точечных источников поля / С. Ю. Князев, Е. Е. Щербакова // Известия вузов. Электромеханика. — 2006. — № 4. — С. 43–47.

15. Ландау, Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — 5-е изд. — Москва : Физматлит, 2003. — 264 с.

16. Poullikkas, A. The method of fundamental solutions for Signorini problems / A. Poullikkas, A. Karageorghis, G. Georgiou // IMA Journal of Numerical Analysis. — 1998. — Vol. 18. — P. 273–285.

17. Raamachandran, J. Analysis of composite plates using charge simulation method / J. Raamachandran, C. Rajamohan // Engineering Analysis with Boundary Elements. — 1996. — Vol. 18. — P. 131–135.

18. Yan Gu. Improved singular boundary method for elasticity problems / Yan Gu, Wen Chen, Xiaoqiao He // Computers & Structures. — 2014. — Vol. 135. — P. 7–82.

19. Marin, L. The MFS-MPS for two-dimensional steady-state thermoelasticity problems / L. Marin, Andreas Karageorghis // Engineering Analysis with Boundary Elements. — 2013. — Vol. 37, iss. 7–8. — P. 1004–1020.

20. Marin, L., Lesnic D. The method of fundamental solutions for the Cauchy problem in two-dimensional linear elasticity / L. Marin, D. Lesnic // International Journal of Solids and Structures. — 2004. — Vol. 41. — P. 3425–3438.

21. Drombosky, T.-W. Applicability of the method of fundamental solutions / T.-W. Drombosky, A.-L. Meyer, L. Ling // Engineering Analysis with Boundary Elements. — 2009. — Vol. 33. — P. 637–643.

22. Smyrlis, Y.-S. Some aspects of the method of fundamental solutions for certain harmonic problems / Y.-S. Smyrlis, A. Karageorghis // Journal of Scientific Computing. — 2001. — Vol. 16 (3). — P. 341–371.

References

1. Pobedrya, B.E. Chislennye metody v teorii uprugosti i plastichnosti. [Numerical methods in the theory of elasticity and plasticity.] 2nd ed. Moscow: Izdatel'stvo MGU, 1995, 366 p. (in Russian).

2. Alyamovskiy, A.A. Inzhenernyy analiz metodom konechnykh elementov. [Engineering finite element analysis.] Moscow: DMK Press, 2004, 426 p. (in Russian).

3. Gromadka II, T.V., Lai, Ch. Kompleksnyy metod granichnykh elementov. [The Complex Variable Boundary Element Method.] Moscow: Mir, 1990, 308 p. (in Russian).

4. Samarskiy, A.A. Teoriya raznostnykh skhem. [The difference scheme theory.] Moscow: Nauka, 1989, 616 p. (in Russian).

5. Aleksidze, M.A. Fundamental'nye funktsii v priblizhennykh resheniyakh granichnykh zadach. [Fundamental functions in the approximate solutions of boundary value problems.] Moscow: Nauka, 1991, 352 p. (in Russian).

6. Bakhvalov, Y.A., Knyazev, S.Y., Shcherbakov, A.A. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh poley metodom tochechnykh istochnikov. [Mathematical modeling of physical fields by the point-source method.] Bulletin of the RAS. Physics, 2008, vol. 72, no. 9, pp. 1259–1261 (in Russian).

7. Knyazev, S.Y. Ustoychivost' i skhodimost' metoda tochechnykh istochnikov polya pri chislennom reshenii kraevykh zadach dlya uravneniya Laplasa. [Stability and convergence of the field point-source method in the numerical solu-

tion of boundary value problems for the Laplace equation.] Izvestiya vuzov. Elektromekhanika, 2010, no. 1, pp. 3–12 (in Russian).

8. Fairweather, G., Karageorghis, A. The method of fundamental solutions for elliptic boundary value problems. Advances in Computational Mathematics, 1998, vol. 9, pp. 69–95.

9. Golberg, M.A., Chen, C.S. The method of fundamental solutions for potential problem numerical and mathematical aspects. Boundary Integral Methods. Numerical and Mathematical Aspects. WIT Press : Southampton, 1998, pp. 103–176 (Computational Mechanics Publications).

10. Chen, J.T., Chen, I.-L., Lee Y.-T. Eigensolutions of multiply connected membranes using the method of fundamental solutions. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2005, vol. 29 (2), pp. 166–174.

11. Golberg, M. A. The method of fundamental solutions for Poisson's equation. Engineering Analysis with Boundary Elements, 1995, vol. 16 (3), pp. 205–213.

12. Katsurada, M., Okamoto, H. The collocation points of the method of fundamental solutions for the potential problem. Computers & Mathematics with Applications, 1996, vol. 31, pp. 123–137.

13. Knyazev, S.Y., Shcherbakova, E.E. Reshenie granichnykh zadach matematicheskoy fiziki metodom tochechnykh istochnikov polya. [Solution to boundary value problems of mathematical physics by the field point-source method.] Izvestiya vuzov. Elektromekhanika, 2007, no. 3, pp. 11–15 (in Russian).

14. Knyazev, S.Y., Shcherbakova, E.E. Reshenie zadach teplo- i massoperenosa s pomoshch'yu metoda tochechnykh istochnikov polya. [Solving problems of heat and mass transfer by the field point-source method.] Izvestiya vuzov. Elektromekhanika, 2006, no. 4, pp. 43–47 (in Russian).

15. Landau, L.D., Livshits, E.M. Teoriya uprugosti. [Elasticity theory.] 5-th ed. Moscow: Fizmatlit, 2003, 264 p. (in Russian).

16. Poullikkas, A., Karageorghis, A., Georgiou, G. The method of fundamental solutions for Signorini problems. IMA Journal of Numerical Analysis,1998, vol. 18, pp. 273–285.

17. Raamachandran, J., Rajamohan, C. Analysis of composite plates using charge simulation method. Engineering Analysis with Boundary Elements, 1996, vol. 18, pp. 131–135.

18. Yan Gu, Wen Chen, Xiaoqiao He. Improved singular boundary method for elasticity problems. Computers & Structures, 2014, vol. 135, pp. 7–82.

19. Marin, L., Karageorghis, A. The MFS-MPS for two-dimensional steady-state thermoelasticity problems. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2013, vol. 37, iss. 7–8, pp. 1004–1020.

20. Marin, L., Lesnic, D. The method of fundamental solutions for the Cauchy problem in two-dimensional linear elasticity. International Journal of Solids and Structures, 2004, vol. 41, pp. 3425–3438.

21. Drombosky, T.-W., Meyer, A.-L., Ling, L. Applicability of the method of fundamental solutions. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2009, vol. 33, pp. 637–643.

22. Smyrlis, Y.-S., Karageorghis, A. Some aspects of the method of fundamental solutions for certain harmonic problems. Journal of Scientific Computing, 2001, vol. 16 (3), pp. 341–371.

Поступила в редакцию 10.10.2014
Сдана в редакцию 17.10.2014
Запланирована в номер 28.01.2015

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 611.737:004 DOI 10.12737/10373

Идентификация кинематических параметров движения локтя с помощью технологий искусственных нейронных сетей*

Ф. Бонилья[1], Е. А. Лукьянов[2], А. В. Литвин[3], Д. А. Деплов[4]**
[1, 2, 3, 4]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Identification of the elbow motion kinematic parameters by means of artificial neural networks technology***

F. Bonilla[1], A. E. Lukyanov[2], A. V. Litvin[3], D. A. Deplov[4]**
[1, 2, 3, 4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью исследования является определение кинематических параметров сгибания локтя с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС). В качестве входов ИНС использовались параметры поверхностной электромиограммы (пЭМГ). Выходом ИНС были кинематические параметры движения: направление, угловое перемещение и угловая скорость. У каждого испытуемого регистрировались сигналы пЭМГ, снимаемые с бицепса при сгибании локтя без нагрузки. Во время эксперимента плечевой и локтевой суставы фиксировались пассивным экзоскелетом. Формирование вектора признаков для нейронной сети выполнялось с помощью методов спектрального и статистического анализов. Статистический анализ во временной области включал в себя определение: дисперсии амплитудных значений пЭМГ, среднеарифметического и среднеквадратического значений абсолютных амплитуд пЭМГ, частоты пересечения нулевой линии сигналом пЭМГ. В частотной области выполнялся спектральный анализ сигналов ЭМГ методом быстрого преобразования Фурье. Определялись спектр мощности, средняя частота спектра мощности. Установлены параметры пЭМГ, использование которых в качестве входных сигналов ИНС обеспечивает наименьшую ошибку оценки параметров движения. ИНС обучалась методом прямого распространения сигнала и обратного распространения ошибки. Наилучшие результаты определения кинематических параметров получены при использовании в качестве входов ИНС средней частоты спектра мощности и общей интегральной мощности сигнала пЭМГ. Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем биоэлектрического управления мехатронными устройствами.

Ключевые слова: пассивный экзоскелет, параметры движения локтя, электромиографический сигнал, статистический анализ, спектральный анализ, искусственная нейронная сеть, Matlab, Simulink.

The research objective is to study elbow flexion kinematic parameters using the artificial neural networks (ANN). Parameters of the surface electromyogram (sEMG) are used as ANN inputs. The ANN output is kinematic parameters of motion: direction, angular displacement, and angular velocity. The study has involved DSTU students and staff (11 people without pathologies of the musculoskeletal system). The sEMG signals taken from the biceps of each trial subject during no-load elbow bending are registered. During the experiment, shoulder and elbow joints are fixed by the passive exoskeleton. The feature vector for the neural network is formed using methods of the spectral and statistical analysis. The statistical analysis in the time domain includes the determination of the following parameters: dispersion of sEMG amplitude values, arithmetic mean value and mean-square value of sEMG absolute amplitudes, sEMG signal zero crossing rates. In the frequency domain, sEMG signal spectral analysis is performed by Fast Fourier Transform method. The power spectrum and the mean frequency of the power spectrum are determined. Best results of determining the kinematic parameters are obtained when using the mean frequency of the power spectrum and the total integrated sEMG signal power as inputs to the ANN. The ANN is trained by the method of the direct signal propagation and the back propagation of error. The results obtained can be used in the development of the bioelectric control systems for the mechatronic devices.

Keywords: passive exoskeleton, elbow motion parameters, electromyographic signal, statistical analysis, spectral analysis, artificial neural network, Matlab, Simulink.

Введение. Электромиографический (ЭМГ) сигнал широко используется для управления различными электромеханическими устройствами: протезами [1, 2], экзоскелетами [3] и другими мехатронными системами. Для управления био-

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**e-mail: vbonilla@yahoo.com, lea_rnd@mail333.com, alit2010@ramler.ru, dimadeplov@gmail.com
***The research is done within the frame of the independent R&D.

электрическими протезами применяют ЭМГ-сигналы от двигательных волокон периферического нерва с помощью имплантируемых электродов. В управлении большинства мехатронных устройств используются параметры поверхностной электромиограммы (пЭМГ) [4].

Скелетные мышцы представляют собой совокупность двигательных единиц (ДЕ). При стимулировании нейронным сигналом каждая ДЕ сокращается и генерирует биоэлектрический сигнал, который является суммой потенциалов действия всех вовлеченных в процесс клеток. Сумма потенциалов называется потенциалом действия отдельной двигательной единицы (ПДОДЕ). Пространственно-временное суммирование ПДОДЕ всех активных двигательных единиц приводит к возрастанию ЭМГ мышцы [5, 6].

Очевидно, мехатронными устройствами можно управлять при условии удаления помех из исходного сигнала пЭМГ и применении искусственных нейронных сетей (ИНС) [7–9]. Проблема получения стабильного пЭМГ-сигнала решается использованием биоусилителей на базе инструментальных усилителей с большим коэффициентом ослабления синфазных сигналов (помех) [1, 10].

В статье приведены методика и результаты исследований пЭМГ, снятых с бицепса, результаты статистических и спектральных анализов, выполненных с целью определения минимально достаточного вектора входных сигналов ИНС, представлена оптимальная архитектура ИНС для определения кинематических параметров движения локтя

Методика исследований. В исследованиях принимали участия одиннадцать студентов ДГТУ (8 мужчин и 3 женщины), не имевшие травм и заболеваний мышц плеча и предплечья. Среднеарифметические и среднеквадратические значения антропометрических параметров испытуемых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Антропометрические параметры испытуемых

Пол	Длина плеча / СКО*, м	Длина предплечья/ СКО, м	Объем бицепса /СКО, м		Вес/СКО, кг	Рост/СКО, см
			Состояние			
			Расслабленное	Напряженное		
Муж.	0,325/0,0132	0,3457/0,0093	0,305/0,0235	0,345/0,0367	83,57/11,41	178,5/4,31
Жен.	0,302/0,0189	0,3283/0,0175	0,2833/0,0321	0,295/0,0346	59,0/10,14	164,33/4,04
*СКО — среднеквадратическое отклонение.						

Для единообразного начального взаиморасположения локтевого и плечевого суставов во время регистрации пЭМГ использовался пассивный экзоскелет [11]. В процессе эксперимента испытуемые совершали угловое движение (сгибание и разгибание) правым предплечьем и кистью в сагиттальной плоскости, проходящей через локтевой и плечевой суставы. Условно предплечье с кистью до конца вытянутого среднего пальца руки будем считать локтем. Угловые движения локтем (сгибание и разгибание) относительно локтевого сустава совершались без нагрузки (рис. 1).

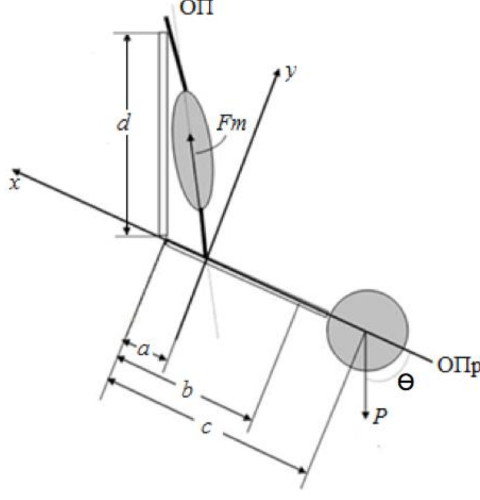


Рис. 1. Векторная модель сгибания локтя [12]: ОП — ось плеча; ОПр — ось предплечья; P — приведенный вес руки; Fm — сила бицепса; θ — угол поворота локтевого сустава; a — расстояние от локтевого сустава до точки вставки бицепса в лучевой кости (радиальная бугристость); b — расстояние от локтевого сустава до центра тяжести предплечья; c — расстояние от локтевого сустава до центра кисти; d — расстояние от локтевого сустава до точки фиксации бицепса

Для записи сигналов пЭМГ на поверхности бицепса по линии мышечных волокон крепились электроды (*Ag–AgCl*) диаметром 12 мм. Расстояние между ними составляло 2 см. Электроды фиксировались с помощью манжеты для обеспечения надежного контакта с кожей предплечья [11]. Место установки обрабатывалась в соответствии с рекомендациями [13]. Сигнал пЭМГ усиливался в 2300 раз и подвергался фильтрации активными полосовыми пропускающими фильтрами Баттерворта с частотами среза 6, 5 и 318 Гц.

Сигналы пЭМГ и гироскопа (угловое перемещение локтя) оцифровывались с частотой 1 кГц и передавались через систему сбора информации *NIUSB*-6212 в ЭВМ. Данная система имеет встроенный 16-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Сигналы пЭМГ обрабатывались с помощью системы Matlab — SimuLink.

Целью экспериментальных исследований являлось изучение состава вектора входных сигналов для искусственной нейронной сети (ИНС), посредством которой предполагается распознавать сигналы ЭМГ и определять количественные параметры движения локтя.

Определение характеристик пЭМГ. Поверхностная электромиограмма является нестационарным случайным процессом и характеризует состояние мышцы на основе электрического потенциала, генерируемого ею при совершении какого-либо действия.

Для анализа пЭМГ-сигнала во временной области вычислялись статистические характеристики, в частотной области использовалось преобразование Фурье для определения основных частотных оценок. Статистический и спектральный анализы выполнялись для наборов данных, формируемых с помощью скользящего временного окна размером 200 мс, без перекрытия предыдущего окна.

В режиме псевдореального времени определялись следующие статистические параметры [13, 14].

Среднее абсолютных значений — параметр, являющийся среднеарифметическим значением биопотенциалов (БП) пЭМГ в скользящем окне (mAV) :

$$mAV = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}|x_k|, \quad (1)$$

где N — число значений БП пЭМГ в скользящем окне; x_k — k-е значение БП пЭМГ.

Среднеквадратическое отклонение (*STD*) характеризует степень рассеивания БП пЭМГ относительно изоэлектрической оси:

$$STD = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{k=1}^{N}(x_k - \bar{X})^2}, \quad (2)$$

где $\bar{X}$ — среднеарифметическое значение БП.

Среднеквадратическое значение биопотенциалов пЭМГ (*RMS*) — это среднеквадратическое значение, вычисленное в пределах окна:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} x_k^2}. \quad (3)$$

Число пересечений сигналом пЭМГ нулевой линии (*ZC*) — это показатель, связанный с частотой и сложностью сигнала. Для устранения влияния низкоамплитудных шумов при обработке сигнала вводился порог ε = 20 мВ. Значение *ZC* инкрементируется, если

$$(\{x_k > 0 \text{ и } x_{k+1} < 0\} \text{ или } \{x_k < 0 \text{ и } x_{k+1} > 0\}) \text{ и } |x_k - x_{k+1}| \geq \varepsilon. \quad (4)$$

Параметр Waveform Length, характеризующий форму сигнала, является мерой его сложности и определялся на основе отсчетов в исследуемом окне [8] следующим образом:

$$WaveLen = \sum_{k=1}^{N}|\Delta x_k|, \text{ где } \Delta x_k = x_k - x_{k-1}. \quad (5)$$

Дисперсия (*var*) пЭМГ-сигнала является усредненной характеристикой его вариабельности относительно среднего значения:

$$var = \frac{1}{N-1}\sum_{k=1}^{N} x_k^2. \quad (6)$$

Дисперсия сигнала в скользящем окне является показателем средней мощности сигнала как функции времени. Дисперсия определена относительно нулевой линии пЭМГ.

Развиваемое мышечное усилие оценивалось посредством параметра *logDet* по следующей зависимости:

$$logDet = e^{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} log|(x_k)|}. \quad (7)$$

Спектральный анализ сигналов пЭМГ выполнялся методом быстрого дискретного преобразования Фурье:

$$X_q = \sum_{m=0}^{M-1} x_m e^{-j\frac{2\pi}{M}qm}, q = 0, \ldots, M-1, \quad (8)$$

где M — количество компонентов разложения; x_m — значения входного вектора; X_q — выходной вектор, состоящий из M комплексных амплитуд синусоидальных сигналов, составляющих исходный сигнал пЭМГ; j — мнимая единица; e — основание натурального логарифма; q — порядковый номер комплексных амплитуд синусоидальных сигналов.

Так же определялись общая мощность спектра в окне, средняя частота, медиана, частота спектральной составляющей, имеющей наибольшую амплитуду [13].

Общая интегральная мощность сигнала *Inte* определялась как

$$Inte = \int_{f_0}^{f_e} p(f)df \sim \sum_{i=0}^{N_f}(f_{i+1} - f_i)\frac{(p_{f_i}+p_{f_{i+1}})}{2}, \qquad (9)$$

где f_0, f_e — частотный интервал спектра мощности пЭМГ сигнала; $p(f)$ — спектральная плотность мощности; N_f — число дискретных частот; f_i — i-е значение дискретной частоты; $p_{f\,i}$ — i-е значение спектральной плотности мощности сигнала пЭМГ.

Изменение спектральных характеристик оценивалось также с помощью определения средней частоты спектра мощности сигнала *MFSP*, которой предполагается определять параметры движения локтя:

$$MFSP = \frac{\sum_{i=0}^{N_f}(f_{i+1}-f_i)\frac{(p_{f_i}+p_{f_{i+1}})}{2}}{\sum_{i=0}^{N_f}p_{fi}}. \qquad (10)$$

Результаты исследований. Для решения задач распознавания фаз движения локтя были спроектированы три нейронные сети, которые содержали нейроны первого слоя, скрытый слой нейронов и выходной слой. Такое решение обусловлено нелинейностью и нестационарностью связей вычисляемых статистических и частотных оценок с параметрами движения локтя. Обучение сетей выполнялось по алгоритмам прямого распространения сигнала и обратного распространения ошибки. Определение наилучшего вектора входных сигналов для каждой из сетей является нетривиальной задачей. При ее решении сравнивались результаты обучения нескольких вариантов каждой из сетей при различных оценках пЭМГ-сигнала на входе. Наилучший вариант ИНС выбирался по результатам сравнения среднеквадратической ошибки (СКО) при распознавании.

Формирование входного вектора выполнялось из следующих характеристик и оценок пЭМГ-сигнала: *MFSP*, *Inte*, *ZC*, *logDet*, *RMS*, *STD*.

Задачи распознавания фаз и параметров движения формулировались следующим образом. Для первой сети: определить наличие/отсутствие движения локтя. Для второй сети: оценить угол поворота (положение) локтя. Для третьей сети: определить направление движения локтя.

При исследовании различных вариантов ИНС для каждой из сетей скрытый слой составлял 5, 10, 15 или 20 нейронов. Нейроны входного и выходного слоя имели линейные функции активации. Сигмоидальная функция применялась на скрытом слое.

Результаты моделирования процессов распознавания для трех вариантов нейронных сетей приведены в табл. 2, 3, 4.

В табл. 2 представлены значения среднеквадратической ошибки распознавания наличия/отсутствия движения для различных наборов входных значений. Как видно из таблицы, наименьшей ошибкой обладает ИНС с входным вектором *MFSP*, *Inte*. Выходное значение ИНС, равное 0, соответствует отсутствию движения, равное 1 — наличию движения.

Таблица 2

Значение СКО распознавания наличия/отсутствия движения предплечья

Кол-во нейронов в скрытом слое	*MFSP*, *Inte*	*ZC*, *logDet*	*MFSP*, *Inte*, *ZC*	*MFSP*, *Inte*, *logDet*	*MFSP*, *Inte*, *ZC*, *logDet*	*MFSP*, *Inte*, *ZC*, *logDet*, *RMS*	*MFSP*, *Inte*, *ZC*, *logDet*, *RMS*, *STD*
	Среднеквадратическое отклонение						
5	0,0284	0,0313	0,0284	0,0299	0,0287	0,0293	0,0286
10	0,0294	0,0304	0,0285	0,0298	0,0285	0,0295	0,0291
15	0,0295	0,0291	0,0288	0,0290	0,0289	0,0286	0,0288
20	0,0293	0,0313	0,0297	0,0328	0,0293	0,0285	0,0298

Необходимо отметить, что для обучения и проверки качества распознавания использовались различные наборы данных. Величина ошибки 0,0284 является малой (см. табл. 2), что позволяет говорить о надежном распознавании ИНС наличия или отсутствия движения на основе пЭМГ-сигнала (рис. 2).

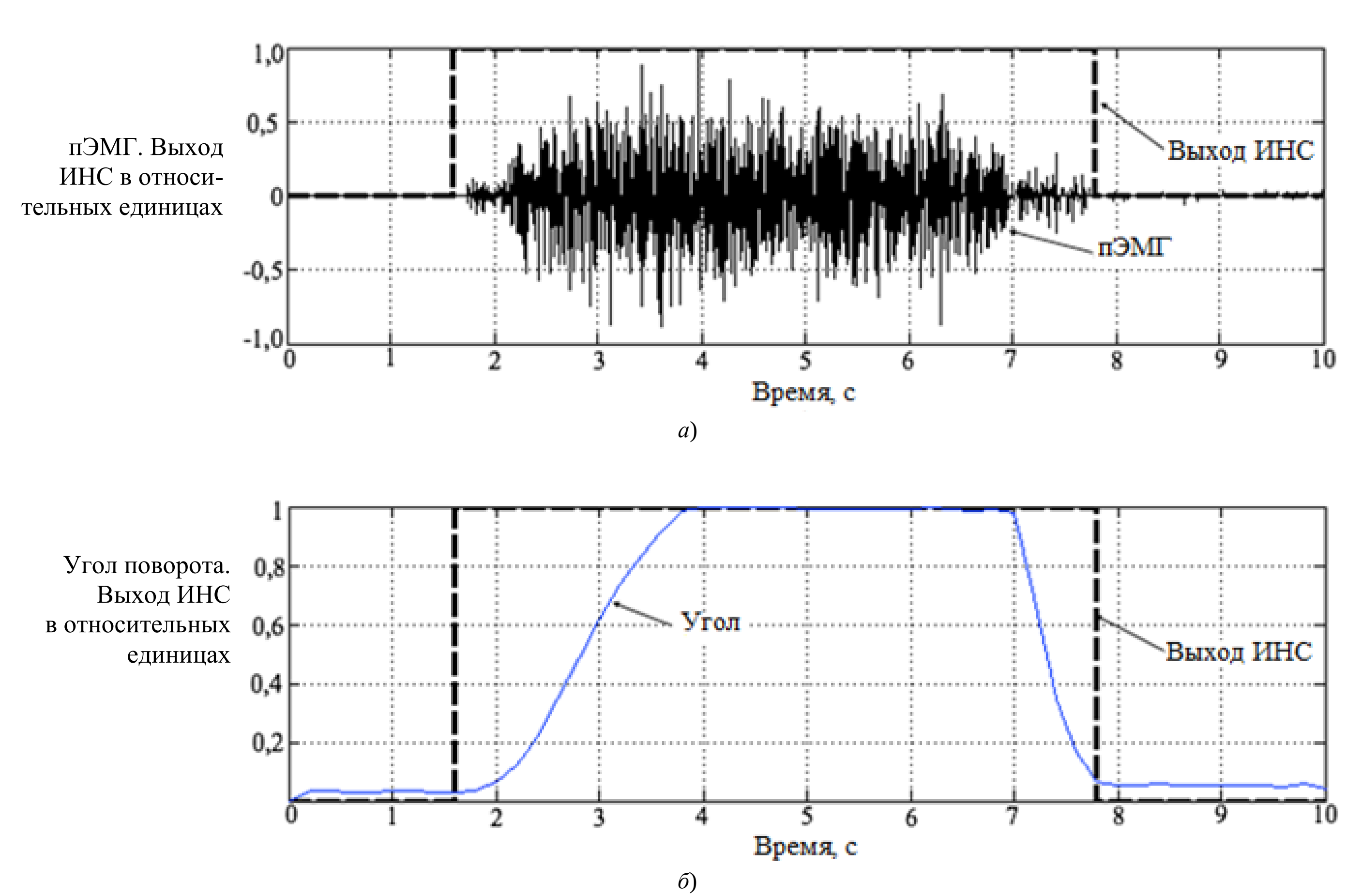


Рис. 2. Выходные значения ИНС при определении наличия движения локтя:
соотношение между выходом ИНС и пЭМГ-сигналом (*а*);
соотношение между выходом ИНС и углом движения локтя (*б*)

Угловое положение локтя оценивалось второй ИНС, качество распознавания которой варьировалось в зависимости от набора входных параметров и количества нейронов скрытого слоя. Результаты моделирования процесса распознавания для второй ИНС приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значение СКО распознавания углового положения локтя

Кол-во нейронов в скрытом слое	*MFSP*, *Inte*	*ZC*, *logDet*	*MFSP*, *Inte*, *ZC*	*MFSP*, *Inte*, *logDet*	*MFSP*, *Inte*, *ZC*, *logDet*	*MFSP*, *Inte*, *ZC*, *logDet*, *RMS*	*MFSP*, *Inte*, *ZC*, *logDet*, *RMS*, *STD*
	Среднеквадратическое отклонение						
5	1,610	1,791	1,589	1,567	1,630	1,528	1,545
10	1,601	1,733	1,562	1,547	1,499	**1,496**	1,474
15	1,586	1,744	1,552	1,549	1,571	1,556	1,511
20	1,554	1,715	1,523	1,518	1,526	1,496	1,503

Выходной сигнал ИНС изменялся от 0 до 90, что соответствует углу поворота локтя 0–90 градусов. Наименьшая ошибка распознавания получена при 10 нейронах скрытого слоя и использовании *MFSP*, *Inte* , *ZC*, *logDet*, *RMS* во входном векторе. Величина ошибки 1, 496 (2 %) может считаться малой.

С помощью третьей ИНС определялся характер движения: +1 — сгибание локтя, 0 — отсутствие движения (пауза); –1 — разгибание локтя. На вход третьей МНС подавались сигналы: *MFSP*, *Inte*, *ZC*, *logDet*, *RMS*, *STD*. Результаты моделирования работы (распознавания) ИНС приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значение СКО определения характера движения

Кол-во нейронов в скрытом слое	*MFSP, Inte*	*ZC, logDet*	*MFSP, Inte, ZC*	*MFSP, Inte, logDet*	*MFSP, Inte, ZC, logDet*	*MFSP, Inte, ZC, logDet, RMS*	*MFSP, Inte, ZC, logDet, RMS, STD*
	Среднеквадратическое отклонение						
5	0,2980	0,3235	0,2984	0,2992	0,2887	0,3593	0,3864
10	0,2943	0,3742	0,3255	0,3298	0,2485	0,2295	0,2296
15	0,2955	0,4491	0,3286	0,3290	0,3893	0,2987	**0,2888**
20	0,2956	0,4413	0,3297	0,3328	0,3992	0,3385	0,3086

Несмотря на отсутствие груза в руках испытуемых, при сгибании — разгибании локтя формируются мышечные усилия. Это объясняется тем, что необходимо перемещать массу самого предплечья и кисти. Поскольку мышечное усилие создает вращающий момент, величина момента, необходимого для удержания предплечья в определенном положении, зависит от углового положения. Были рассмотрены зависимости развиваемой мышечной силы и момента от положения предплечья с учетом изменения размеров мышцы.

Регистрация угла поворота, определение угловой скорости, длины мышцы бицепса и развиваемого момента в соответствии со схемой (см. рис. 1) выполнялись в *Simulink* системы *Matlab*. В псевдореальном масштабе времени рассчитывались: скорость движения, текущая длина мышцы и момент силы.

Изменения длины бицепса и развиваемого момента при движении локтя без нагрузки в относительных единицах приведены на рис. 3. Видно, что наибольшее сокращение мышцы соответствует максимальному моменту.

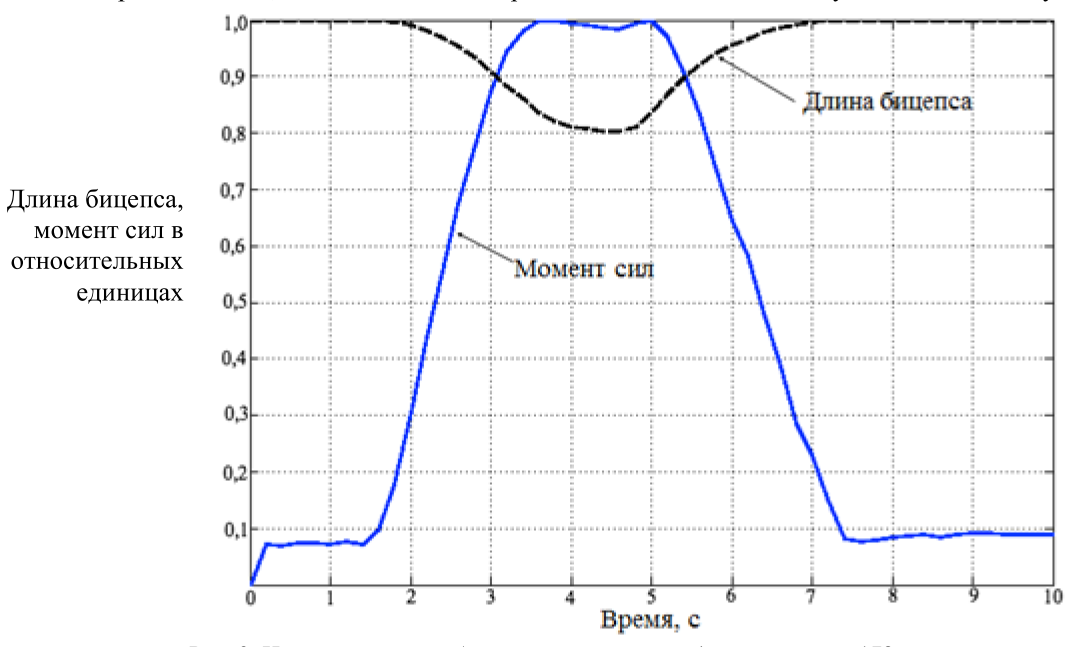


Рис. 3. Изменение длины бицепса и момента сил (мужчина, рост 178 см; объем бицепса 30/33 см; вес 82 кг). Движение локтя без нагрузки

Момент силы, развиваемый бицепсом (10), и его длина (11) определись в соответствии с рис. 1:

$$M = \frac{da\sin\theta(t)}{\sqrt{(a\sin\theta(t))^2+(d+a\cos\theta(t))^2}}, \quad (10)$$

$$l = \sqrt{(a\sin\theta(t))^2+(d+a\cos\theta(t))^2}. \quad (11)$$

Очевидно, что пЭМГ-сигнал, фиксируемый при выполнении движений локтем, содержит информацию о параметрах движения и мышечных усилиях. Экспериментальные исследования с использованием обученных нейронных сетей позволили установить следующее. При определении угла поворота предплечья имеет место разброс (дисперсия) выходных значений нейронной сети (рис. 4). Для повышения качества распознавания после ИНС был использован фильтр Савицкого — Голея с порядком $k = 1$ и размером кадра $f = 9$. При этом результирующая величина СКО составила 0,13, а график изменения выходного сигнала не имел разрывов первого рода.

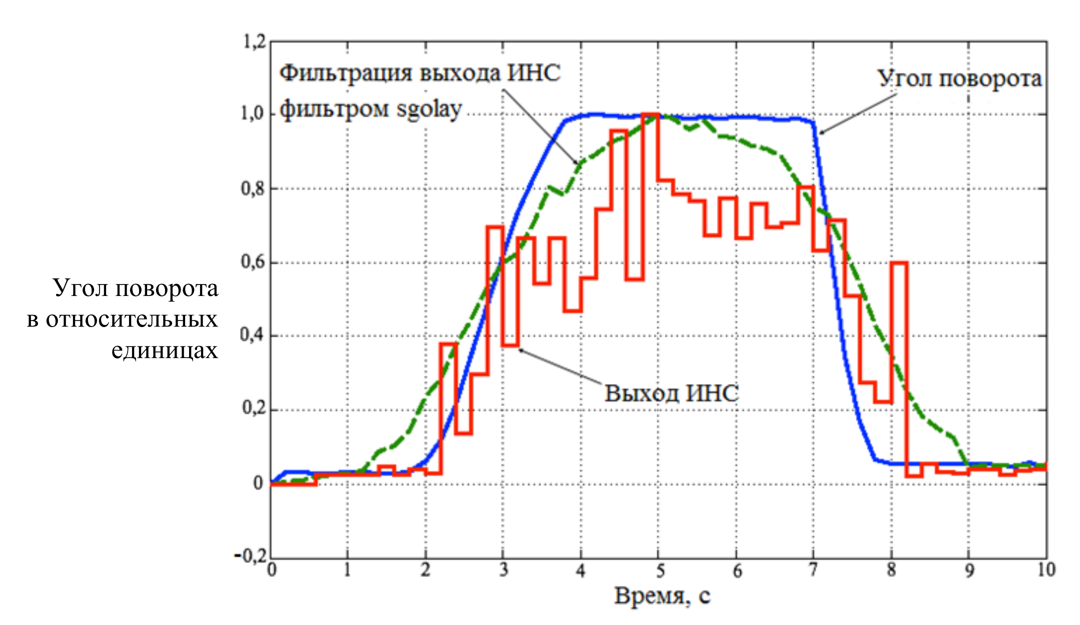


Рис. 4. Угол поворота локтя (в относительных единицах). Показаны: выходной сигнал ИНС, сигнал датчика углового положения (гироскоп), результат фильтрации выходного сигнала ИНС

Аналогичные экспериментальные исследования работы ИНС для распознавания характера движений разгибания/сгибания позволили установить, что характер изменения выходного сигнала ИНС соответствует характеру изменения скорости движения предплечья (рис. 5).

В силу нестационарности процессов, сопровождающих иннервацию мышечной активности и процессы в мышцах при выполнении движений, имеет место разброс выходных значений ИНС. Применение фильтра Савицкого — Голея (k = 1, f = 9) позволяет значительно улучшить качество выходного сигнала во всех фазах движения. Из полученных результатов экспериментальных исследований и моделирования процессов распознавания можно сделать следующее заключение. Применение обученной ИНС и последующая фильтрация ее выходного сигнала позволяют осуществлять оценку скорости выполнения движений локтем.

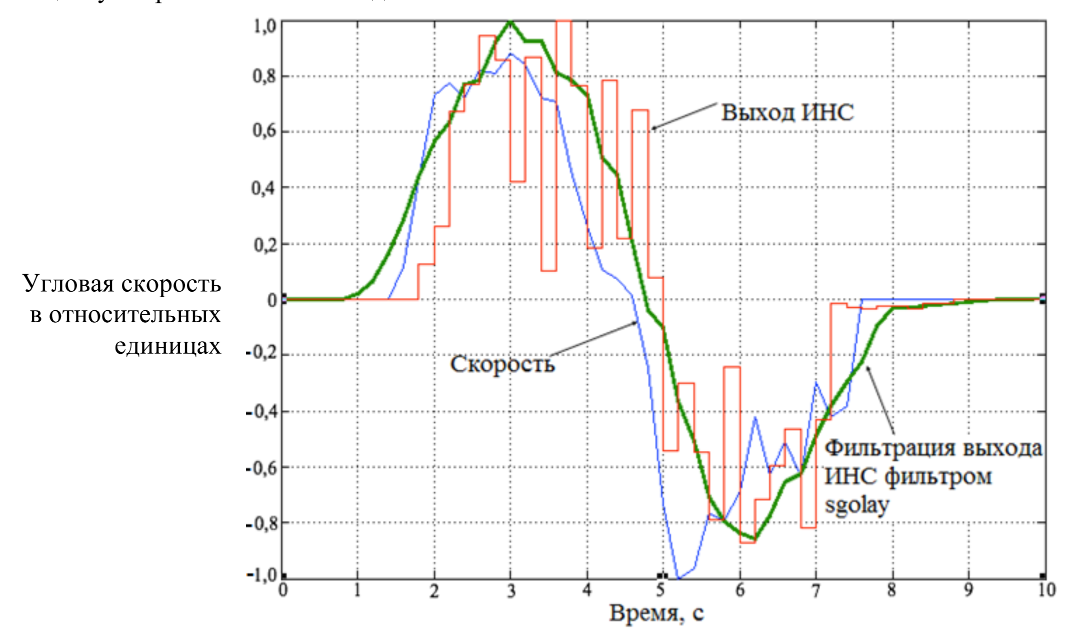


Рис. 5. Распознавание характера движения предплечья. Показаны: выходной сигнал ИНС, результат его фильтрации, скорость предплечья (измерялась гироскопическим датчиком)

Среднеквадратическая ошибка распознавания (оценка) угловой скорости составила 0,26, а после фильтрации — 0,20.

Заключение. Выполненные экспериментальные исследования, моделирование и анализ полученных результатов показали, что наилучшие результаты распознавания наличия движения могут быть получены посредством ИНС, обу-

ченной с вектором входных параметров *MFSP*, *Inte*. Также установлено, что с использованием ИНС и соответствующих процедур фильтрации на основе пЭМГ-сигналов мышечной активности возможно решение задач оценки параметров движения предплечья, в том числе для оценки угла поворота и оценки скорости движения. Среднеквадратическая ошибка оценки угла и скорости в исследованиях не превышала 20 %. Таким образом, решены задачи, позволяющие разрабатывать системы биоэлектрического управления мехатронными устройствами.

Библиографический список

1. Современные системы управления протезами. Конструкции электродов и усилителей биосигналов [Электронный ресурс] / Д. Сафин [и др.] // Электроника: наука, технология, бизнес. — 2009. — № 4. — Режим доступа: http://www.electronics.ru/journal/article/219 (дата обращения 26.11.14).

2. Chrapka, Ph. EMG Controlled Hand Prosthesis: EMG Classification System [Электронный ресурс] / Ph. Chrapka // Electrical and Biomedical Engineering Design Project (4BI6). Department of Electrical and Computer Engineering. — Режим доступа: http://digitalcommons.mcmaster.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1034&context=ee4bi6 (дата обращения 26.11.14).

3. Khokhar, Z.-O. Surface EMG pattern recognition for real-time control of a wrist exoskeleton [Электронный ресурс] / Z.-O. Khokhar, Z.-G. Xiao, C. Menon // Biomedical Engineering Online. — Режим доступа: http://www.biomedical-engineering-online.com/content/9/1/41 (дата обращения 26.11.14).

4. Online Electromyographic Control of a Robotic Prosthesis [Электронный ресурс] / P. Shenoy [et al.] // Transactions on biomedical engineering. — 2008. — Vol. 55, № 3. — P. 1128–1135. — Режим доступа: http://homes.cs.washington.edu/~rao/emg-08.pdf (дата обращения 26.11.14).

5. The Relationship Between Electromyography and Muscle Force [Электронный ресурс] / U.-K. Heloyse [et al.] // — Режим доступа: http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/25852.pdf (дата обращения 26.11.14).

6. Рангайян, Р. М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход / Р. М. Рангайян. — Москва : Физматлит, 2007. — 440 с.

7. De Luca, C.-J. The use of surface electromyography in biomechanics / C.-J. De Luca // Journal of Applied Biomechanics. — 1997. — № 13 (2). — P. 135–163.

8. Uchiyama, T. Static torque-angle relation of human elbow joint estimated with artificial neural network technique / T. Uchiyama, T. Bessho, K. Akazawa // Journal of Biomechanics. — 1998. — № 31. — P. 545–554.

9. Итоги и перспективы развития исследований в области интеллектуального управления мехатронными технологическими системами / А. К. Тугенгольд [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2010. — № 5. — С. 48–67.

10. Анализ сигнала ЭМГ двуглавой мышцы плеча в среде LabVIEW / В.-Ф. Бонилья [и др.] // Инновации, экология и ресурсосберегающие технологии (ИНЭРТ-2014) : тр. XI междунар. науч.-техн. форума. — Ростов-на-Дону, 2014. — С. 1394–1401.

11. Влияние кинематических параметров движения локтя на электромиографический сигнал двуглавой мышцы плеча / В. Ф. Бонилья [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — № 4. — С. 48–67.

12. Arango, J.-C.-A. Abordaje físico-matemático del gesto articular [Электронный ресурс] / J.-C.-A. Arango, D.-C. Nieto, J.-C. Giraldo // EFDeportes.com. — 2012. — № 171. — Режим доступа http://www.efdeportes.com/efd171/abordaje-fisico-matematico-del-gesto-articular.htm (дата обращения 02.12.14).

13. Konrad, P. The ABC of EMG. A Practical Introduction to Kinesiological Electromyography. Version 1.4, March 2006. Noraxon INC [Электронный ресурс] / P. Konrad. — Режим доступа https://hermanwallace.com/download/The_ABC_of_EMG_by_Peter_Konrad.pdf (дата обращения 02.12.14).

14. Tkach, D. Study of stability of time-domain features for electromyographic pattern recognition [Электронный ресурс] / D. Tkach, H. Huang, T.-A. Kuiken // Journal of Neuroengineering and Rehabilitation. — 2010. — № 7. — P. 21. — Режим доступа: http://www.jneuroengrehab.com/content/7/1/21/ (дата обращения 26.11.14).

References

1. Safin, D., et al. Sovremennye sistemy upravleniya protezami. Konstruktsii elektrodov i usiliteley biosignalov. [Modern Prosthetic Devices Control Systems. Electrodes and Biosignals Amplifiers Structure.] Electronics: Science, Technology, Business. 2009, no. 4. Available at: http://www.electronics.ru/journal/article/219 (accessed: 26.11.14) (in Russian).

2. Chrapka, Ph. EMG Controlled Hand Prosthesis: EMG Classification System. Electrical and Biomedical Engineering Design Project (4BI6). Department of Electrical and Computer Engineering. Available at: http://digitalcommons.mcmaster.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1034&context=ee4bi6 (accessed: 26.11.14).

3. Khokhar, Z.-O., Xiao, Z.-G., Menon, C. Surface EMG pattern recognition for real-time control of a wrist exoskeleton. Biomedical Engineering Online. Available at: http://www.biomedical-engineering-online.com/content/9/1/41 (accessed: 26.11.14).

4. Shenoy, P., et al. Online Electromyographic Control of a Robotic Prosthesis. Transactions on biomedical engineering, 2008, vol. 55, no. 3, pp. 1128–1135. Available at: http://homes.cs.washington.edu/~rao/emg-08.pdf (accessed: 26.11.14).

5. Heloyse, U.-K., et al. The Relationship between Electromyography and Muscle Force. Available at: http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/25852.pdf (accessed: 26.11.14).

6. Rangayan, R.M. Analiz biomeditsinskikh signalov. Prakticheskiy podkhod. [Analysis of biomedical signals. Practical approach.] Moscow: Fizmatlit, 2007, 440 p. (in Russian).

7. De Luca, C.-J. The use of surface electromyography in biomechanics. Journal of Applied Biomechanics, 1997, no. 13 (2), pp. 135–163.

8. Uchiyama, T., Bessho, T., Akazawa, K. Static torque-angle relation of human elbow joint estimated with artificial neural network technique. Journal of Biomechanics, 1998, no. 31, pp. 545–554.

9. Tugengold, A.K., et al. Itogi i perspektivy razvitiya issledovaniy v oblasti intellektual'nogo upravleniya mekhatronnymi tekhnologicheskimi sistemami. [Mechatronics technological systems intellectual management prospects and results.] Vestnik of DSTU, 2010, no. 5, pp. 48–67 (in Russian).

10. Bonilla, F., et al. Analiz signala EMG dvuglavoy myshtsy plecha v srede LabVIEW. [Analysis of the EMG signal of the biceps with LabVIEW.] Innovatsii, ekologiya i resursosberegayushchie tekhnologii (INERT-2014) : tr. XI mezhdunar. nauch.-tekhn. foruma. [Innovation, ecology and energy saving technologies (INERT-2014): Proc. XI Int. Sci.-Tech. Forum.] Rostov-on-Don, 2014, pp. 1394–1401 (in Russian).

11. Bonilla, F., et al. Vliyanie kinematicheskikh parametrov dvizheniya loktya na elektromiograficheskiy signal dvuglavoy myshtsy plecha. [Effect of kinematic parameters of elbow motion on biceps electromyographic signal.] Vestnik of DSTU, 2014, no. 4, pp. 48–67 (in Russian).

12. Arango, J.-C.-A., Nieto, D.-C., Giraldo, J.-C. Abordaje físico-matemático del gesto articular. EFDeportes.com. 2012, no. 171. Available at http://www.efdeportes.com/efd171/abordaje-fisico-matematico-del-gesto-articular.htm (accessed: 02.12.14).

13. Konrad, P. The ABC of EMG. A Practical Introduction to Kinesiological Electromyography. Version 1.4, March 2006. Noraxon INC. Available at https://hermanwallace.com/download/The_ABC_of_EMG_by_Peter_Konrad.pdf (accessed: 02.12.14).

14. Tkach, D., Huang, H., Kuiken, T.-A. Study of stability of time-domain features for electromyographic pattern recognition. Journal of Neuroengineering and Rehabilitation, 2010, no. 7, p. 21. Available at: http://www.jneuroengrehab.com/content/7/1/21/ (accessed: 26.11.14).

Поступила в редакцию 12.01.2015
Сдана в редакцию 18.01.2015
Запланирована в номер 28.01.2015

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 536.248.2.001.24 DOI 10.12737/10374

Исследование критической плотности теплового потока при квазистационарном нагреве поверхностно кипящих бинарных смесей*

В. В. Кожокару[1], Е. В. Лыков[2]**
[1,2]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Study on critical heat flux density at the quasi-stationary heating of superficially boiling binary mixtures ***

V.V. Kozhokaru[1], E.V. Lykov[2]**
[1,2]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Измерены плотность теплового потока и температура нагревателя одновременно при различных недогревах жидкости до точки кипения. В экспериментах применен квазистационарный метод нагрева, благодаря которому можно точно зафиксировать критическую плотность теплового потока ($q_{кр}$) и температуру нагревателя ($T_{ст}$). На основании экспериментального изучения поверхностного кипения определено, что критическая плотность теплового потока значительно зависит от недогрева жидкости. При температуре ядра жидкости $T_я$= 30 ^{0}C в смеси вода-*n*-бутанол 10 % критическая плотность теплового потока достигает значительной величины 20,68 МВт/м^2, а при $T_я$=90 ^{0}C в разы меньшей $q_{кр}$=2,98 МВт/м^2. Это связано с увеличением температурного напора (ΔT=$T_{ст\ кр}$+$T_я$) в момент возникновения $q_{кр}$.

Ключевые слова: поверхностное кипение смесей, критическая плотность теплового потока ($q_{кр}$), температурный напор (ΔT).

The heat-flow rate and temperature of the heater are measured at various liquid subcooling boiling points. An experimental plant and the obtained results on the heat energy motion in the superficially boiling binary liquid mixtures are described. The experiments have used a quasi-stationary heating method which allows accurate specifying of the critical heat flux (q_{kr}) and the temperature of the heater (T_h).
An experimental study of the superficial boiling has determined that the critical heat flux density depends significantly on the liquid subcooling. At the liquid nucleus temperature T_L=30 ^{0}C in the mixture of water-*n*-butanol, 10% critical heat flux reaches a considerable size of 20.68 MW/m^2, and at T_L=30 ^{0}C – much less q_{kr}=2.98 MW/m^2. This is due to the increase in the temperature drop (ΔT =$T_{h\ kr}$+T_L) at the moment of q_{kr}.

Keywords: superficial boiling of mixtures, critical heat flux (q_{kr}), temperature drop (ΔT).

Введение. Значительно увеличить производство электрической энергии возможно только за счет строительства или модернизации тепловых электростанций [1]. Все тепловые электростанции работают по циклу Ренкина, где в качестве рабочего тела можно использовать только пар. Большое количество пара получают при кипении, поэтому изучение процесса кипения представляет научный и практический интерес.

При нагреве кипящей жидкости обнаруживается критическая (максимальная) плотность теплового потока $q_{кр}$ [2], которая соответствует максимальной скорости пара, отходящего от поверхности нагрева. Цель работы — определить величину $q_{кр}$ и $T_{ст\ кр}$ при различных недогревах ядра жидкости.

Экспериментальная установка и методика эксперимента. Подвод тепла в жидкость осуществлялся от медной проволоки-нагревателя *d*=50 мкм, длиной 49,5 мм. В качестве тепловыделяющего элемента проволока выбрана неслучайно, т.к. достоверные данные по $q_{кр}$ можно получить только при кипении на достаточно нагретой проволоке [3]. Нагреватель крепился на стержни 8х8 мм с помощью специальных держателей, которые обеспечивали надежное соединение без падения напряжения. От аккумуляторных батарей на стержни через регулятор тока (1) поступала электрическая мощность. Регулятор тока выполнен на базе транзисторов TIP 3055. Для поддержания постоянной температуры радиоэлементов регулятор тока был собран на радиаторе с принудительным воздушным охлаждением. Ток *I* и паде-

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** e-mail: kogokary@rambler.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

ние напряжения на проволоке *U* измерялось с помощью цифровых мультиметров и токовых клешей *APPA*. Данные сохранялись на ЭВМ с частотой 0,5 с.

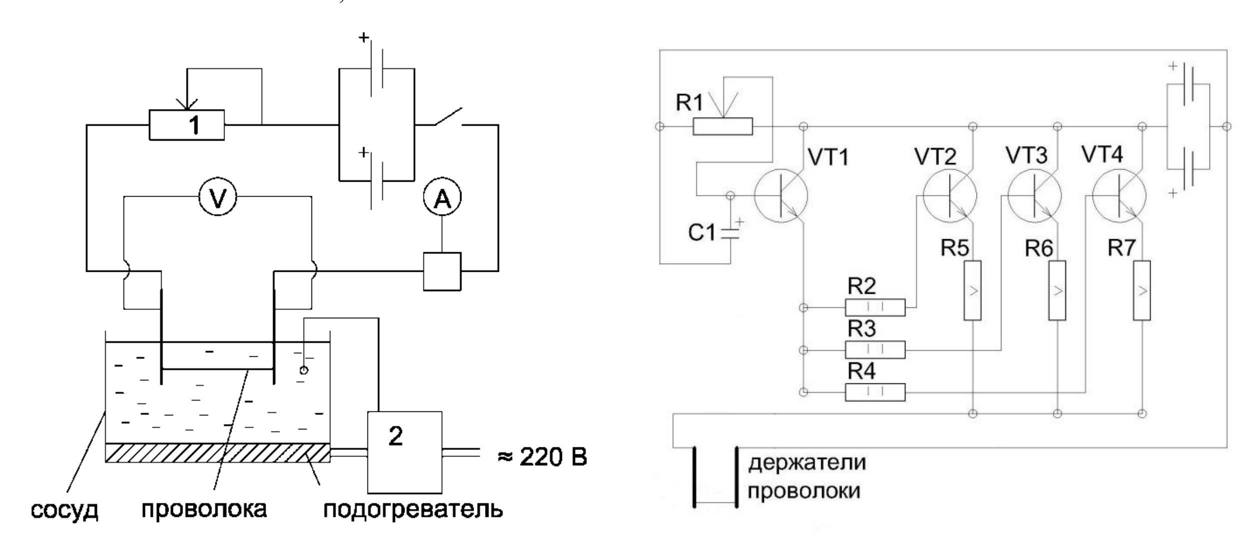


Рис.1. Экспериментальная установка. Слева — схема установки, справа — принципиальная схема регулятора тока

Стеклянный сосуд, в котором кипела исследуемая жидкость, представлял собой цилиндр объемом 150 мл. В качестве исследуемых жидкостей использовались вода дистиллированная техническая ГОСТ 6709-72, этанол «Люкс» ГОСТ 30536-97, *n*-бутанол чистый для анализов ГОСТ 6006-78 и их смеси. Температура ядра жидкости $T_я$ фиксировалась с помощью ртутного термометра ТЛ-2. Для поддержания заданной $T_я$ использовался прецизионный термостат (2) с внешним подогревателем.

Перед проведением опыта проволока обязательно прокаливалась при пропускании через нее постоянного электрического тока в воздушной среде. Температура прокаливания должна превышать максимальную температуру предстоящих измерений для того, чтобы устранить механические неоднородности в проволоке, оказывающие влияние на термоэлектрические свойства термометра сопротивления. Такой особый метод обработки проволоки мы назвали кондиционированием [4]. В опытах без предварительного кондиционирования проволоки не удавалось получить хорошей статистики.

Нагреватель погружался в жидкость на 1 см от поверхности жидкости и служил термометром сопротивления и датчиком выделяемой мощности. Средняя температура поверхности проволоки определялась по ранее полученной градуировочной кривой зависимости температуры проволоки от сопротивления проволоки.

Установка обеспечивала квазистатический метод нагрева, т. е. по мере увеличения температуры нагревателя $T_{ст}$ устанавливались постоянные температура пристеночного слоя, плотность теплового потока и количество центров парообразования. Регулятор тока давал возможность плавного увеличения $T_{ст}$.

Кривая кипения. На установке получена кривая кипения (рис. 2) в *n*-бутаноле при температуре ядра жидкости $T_я$=117 ^{0}С на медной проволоке-нагревателе *d*=50 мкм при квазистационарном нагреве. Кривой кипения называют зависимость плотности теплового потока от температуры нагревателя при кипении жидкости.

При нагреве от $T_{ст}$=117 ^{0}С до 125 ^{0}С (на рис. 2 точка А) в жидкости наблюдается конвекция кипящей жидкости. В этом диапазоне температур поток тепловой энергии от нагретой стенки к жидкости незначительный, q< 0,05 МВт/м^2. При дальнейшем квазистанионарном увеличении температуры нагревателя ($T_{ст}$=125 ^{0}С) происходит вскипание жидкости. В области 125<$T_{ст}$<157 ^{0}С пузырьковое кипение развивается, при этом очень интенсивно возрастает величина q (с 0,05 до 0,71 МВт/м^2). В 1-бутаноле начало кризиса кипения (на рис. 2 точка Б) наступает при величине $q_{кр}$=0,71 МВт/м^2 и $T_{ст\ кр}$=157 ^{0}С. С дальнейшим увеличением $T_{ст}$>$T_{ст\ кр}$ плотность теплового потока q по каким-то причинам не увеличивается. По-видимому, в этой точке на плотность потока энергии жидкость накладывает ограничения. При этом происходит смена режима кипения [5]. В точке Г плотность теплового потока q возобновляет свой рост, вплоть до расплавления нагревателя.

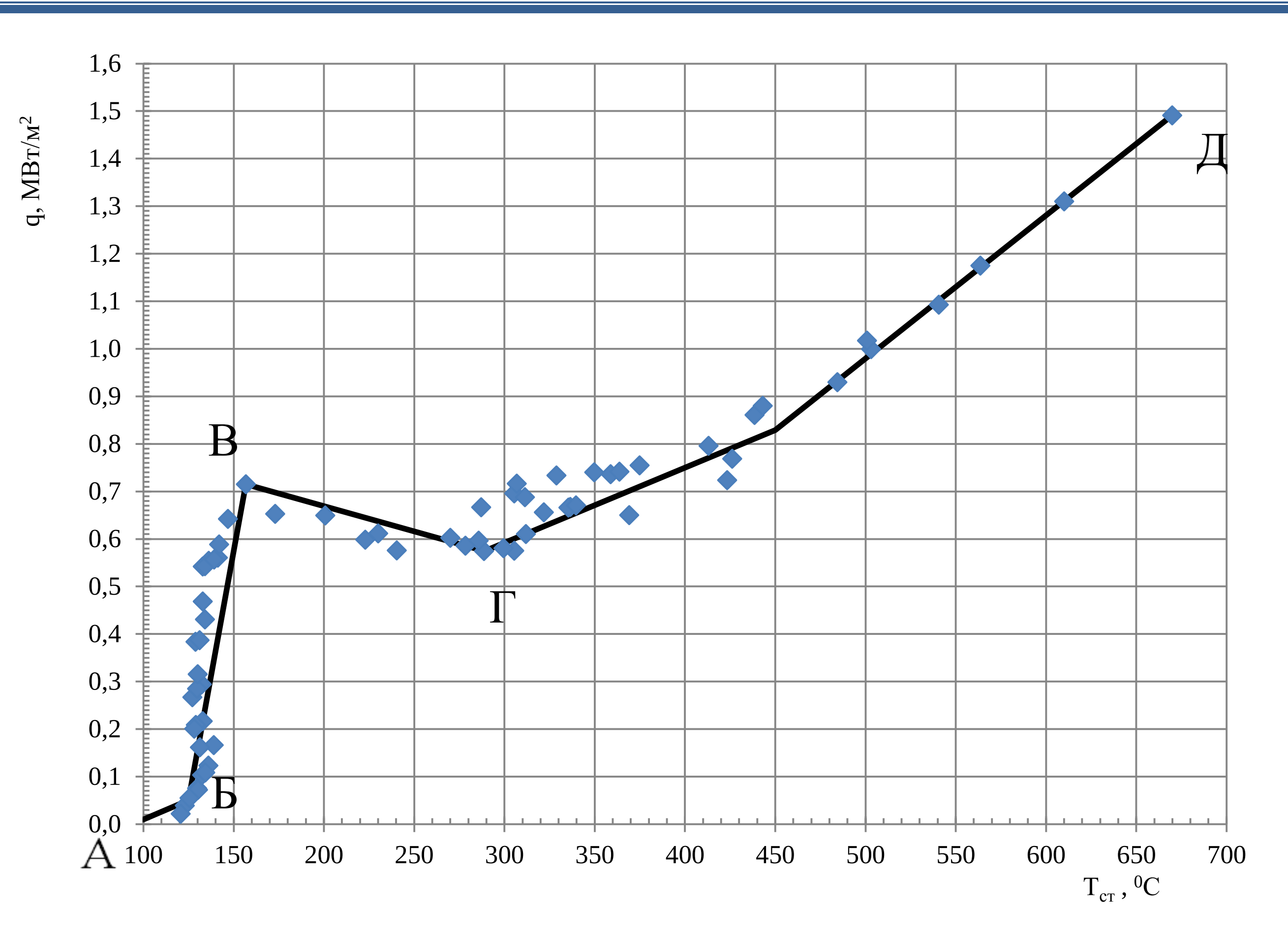


Рис. 2. Кривая кипения при поверхностном насыщенном кипении *n*-бутанола
Кривая кипения описывается уравнением Ньютона – Рихмана

$$q=\alpha\cdot\Delta T=\alpha\cdot(T_{ст}-T_{я}), \qquad (1)$$

где α — коэффициент теплоотдачи; $T_{ст}$ — температура поверхности нагрева; $T_{я}=const$ температура жидкости при насыщенном кипении.

В уравнении (1) α зависит от $T_{ст}$. В экспериментах по насыщенному кипению измеряют q, $T_{ст}$ и $T_{я}$, а затем вычисляют α. При кипении воды на платиновой проволоке-нагревателе d=200 мкм по данным Ван Стралена [6] $q_{кр}$=0,7 МВт/м^2, $T_{ст\ кр}$=121 ^{0}С, $\alpha_{кр}$=33,3 кВт/Км^2.

Обсуждение результатов. На описанной экспериментальной установке получены кривые кипения в смеси вода-этанол 20 % по массе этанола и вода-*n*-бутанол 10 % по массе *n*-бутанола при 30<$T_{я}$<90 ^{0}С. Каждая кривая кипения была получена по результатам трех реализаций кривой кипения. По кривой кипения определены $q_{кр}$ и $T_{ст\ кр}$. Зависимости $q_{кр}$ от $T_{я}$ в двух исследуемых нами смесях приведены на рис. 3. На рис. 4 представлены результаты по определнию $\Delta T=T_{ст\ кр}-T_{я}$ в смесях вода-этанол 20 % по массе и вода-*n*-бутанол 10 %. Каждая точка на графике есть результат обработки кривой кипения, полученной при заданных условиях.

По результатам экспериментов $q_{кр}$ зависит от температуры ядра жидкости. При кипении смеси вода-этанол 20 % при $T_{я}$=30 ^{0}С, $q_{кр}$=21,97 МВт/м^2, а при $T_{я}$=80 ^{0}С, $q_{кр}$=4,88 МВт/м^2. В смеси вода-*n*-бутанол 10 % при $T_{я}$=70 ^{0}С, $q_{кр}$=13,82 МВт/м^2, а при $T_{я}$=90 ^{0}С, $q_{кр}$=2,98 МВт/м^2.

Для определения максимального коэффициента теплоотдачи при ненасыщенном кипении уравнения (1) можно записать:

$$\alpha_{кр}=q_{кр}/(T_{ст\ кр}-T_{я}). \qquad (2)$$

Рассчитав значения $\alpha_{кр}$ по формуле (2) получим, что в диапазоне температур $T_{я}$ от 30 до 90 ^{0}С в смеси вода-*n*-бутанол 10 % величина $\alpha_{кр}$ увеличивается от 71,7 до 191,2 кВт/К м^2, а в смеси вода-этанол 20 % от 81,1 до 182,5 кВт/Км^2, т.е. увеличивается более чем в 2 раза.

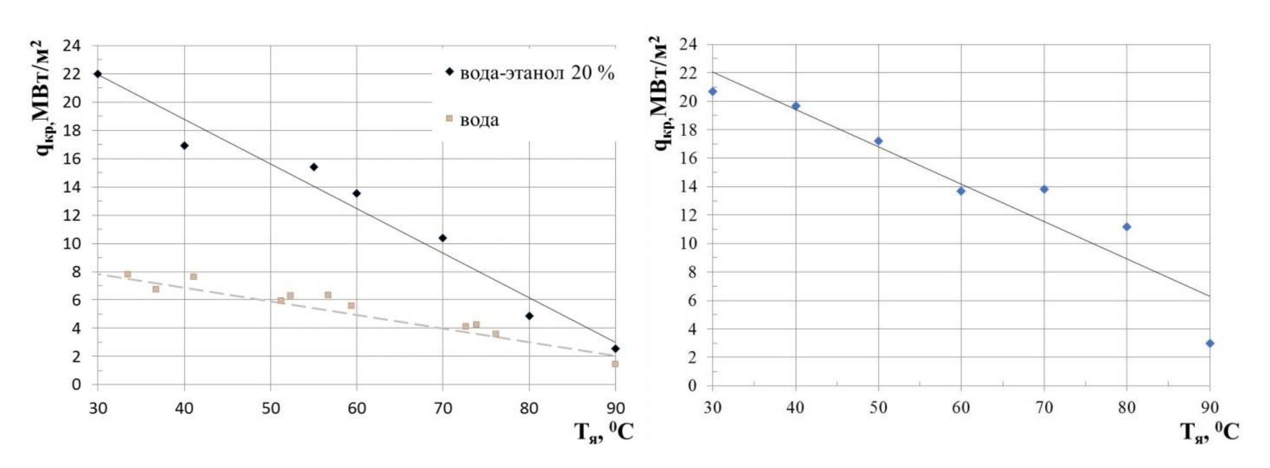


Рис. 3. Зависимость $q_{кр}$ от $T_я$, слева — в смеси вода-этанол 20 % по массе и воды по данным Ван Стралена [7], справа — в смеси вода-*n*-бутанол 10 % по массе

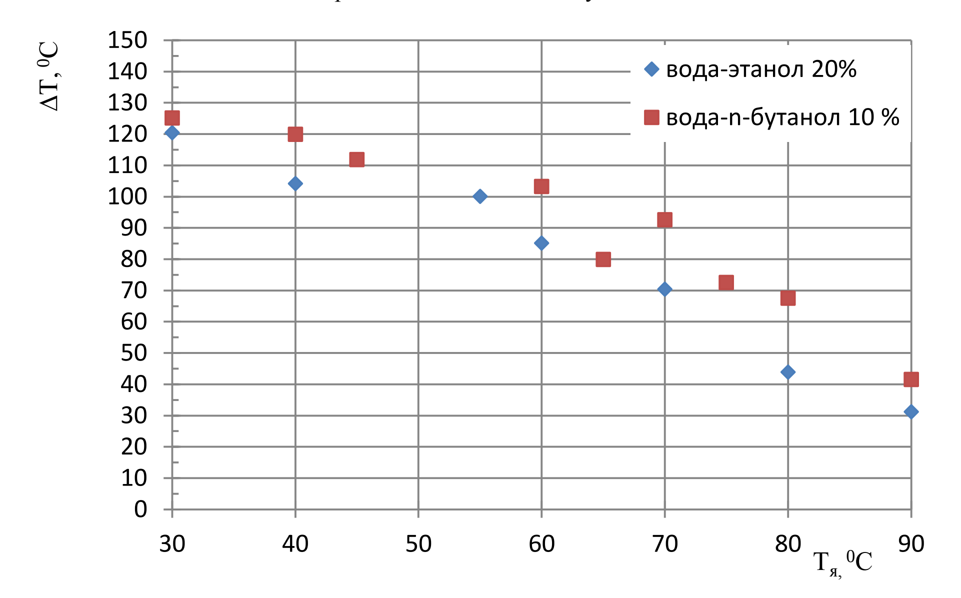


Рис. 4. Зависимость $\Delta T = T_{ст\ кр} - T_я$ от $T_я$

Из рис. 3 и 4 прослеживается связь между $q_{кр}$ и ΔT. Если в жидкости можно достичь большего значения ΔT, то в ней будет наблюдаться более высокое значение $q_{кр}$.

Из уравнения Лапласа, получим следующее уравнение [9]:

$$r_0 \sim 2\sigma / p' \Delta T, \tag{3}$$

где r_0 — радиус кривизны наименьшего из действующих центров парообразования; σ — поверхностное натяжение; p' — производная давления.

С увеличением ΔT уменьшается r_0, что способствует увеличению количества центров парообразования на поверхности нагрева. Увеличение количества центров парообразования при уменьшении $T_я$ так же подтверждается нашими наблюдениями и наблюдениями, представленными в работе [9].

На центрах парообразования происходит интенсивное выделение тепловой энергии по сравнению с остальной поверхностью нагрева, которая покрыта жидкостью. Ведь для превращения 1 г воды при $T_я$=110 °С в пар необходимо затратить порядка 2229,7 Дж, а для нагрева 1 г при той же температуре воды на 1 °С всего 4,217 Дж [10]. Увеличение центров парообразования на поверхности нагрева способствует повышению плотности теплового потока q. Таким образом увеличение $\Delta T = T_{ст\ кр} - T_я$ приводит к возрастанию $q_{кр}$.

Плотности теплового потока более 0,5 МВт/м² труднодостижимы в технике. Так на ТЭНах возможно достичь плотность теплового потока порядка 0,03–0,4 МВт/м², на тепловых трубах новой конструкции 0,1–0,2 МВт/м², в современных тепловых котлах 0,2–0,3 МВт/м². Максимально достижимые плотности теплового потока на ТВЭЛе атомных реакторов 2 МВт/м². Планируемый тепловой поток через стенку вакуумной камеры в термоядерных реакторах типа Токамак может достичь плотности теплового потока 1–10 МВт/м² [11]. Во всех этих теплообменных установках используют воду. Замена теплоносителя, например, на смесь вода-этанол 20 % повысит тепловой поток, отходящий от нагревателя в несколько раз.

Выводы:

1. Критическая плотность теплового потока $q_{кр}$ существенно зависит от температуры ядра жидкости $T_я$. В смеси вода-этанол 20 % и вода-*n*-бутанол 10 % значения $q_{кр}$ всегда выше, чем в воде. При $T_я$=30 ^{0}С в смеси вода-этанол 20 % экспериментально получено $q_{кр}$=21,97 МВт/м^2, при $T_я$=80 ^{0}С, $q_{кр}$=4,88 МВт/м^2, в смеси вода-*n*-бутанол 10 % $T_я$=70 ^{0}С, $q_{кр}$=13,82 МВт/м^2, при $T_я$=90 ^{0}С, $q_{кр}$=2,98 МВт/м^2.
2. Доказано, что в уравнении (2) $q_{кр}$, $\alpha_{кр}$, $T_{ст\ кр}$ зависят от $T_я$. При уменьшении $T_я$ с 90 ^{0}С до 30 ^{0}С величина $q_{кр}$, $\alpha_{кр}$, $T_{ст\ кр}$ значительно, более чем в 2 раза возрастают (рис. 3 и 4).
3. Увеличение ΔT=$T_{ст\ кр}$-$T_я$ способствует возрастанию $q_{кр}$. В смесях вода-этанол 20 % и вода-*n*-бутанол 10 % при достижении наибольшего температурного напора ΔT=$T_{ст\ кр}$-$T_я$ наблюдаться более высокое значение $q_{кр}$.

Библиографический список

1. Буров, В. Д. Тепловые электрические станции / В. Д. Буров, Е. В. Дорохов, Д. П. Елизаров. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2009. — 466 с.
2. Nukiyama, S. The maximum and minimum values of the heat Q transmitted from metal to boiling water under atmosphere pressure / S. Nukiyama // Iht. J. Heat Mass Transfer. — 1984. — Vol. 27 — p. 959–970.
3. Бонилла, Ч. Вопросы теплопередачи в ядерной физике / Ч. Бонилла. — Москва : Госатомиздат, 1961. — 314 с.
4. Lykov, E. V. Thermoacoustic effects in surface boiling liquids / E.V. Lykov // Int. J. Heat Mass Transfer. — 1972. — Vol. 15. — p. 1603–1614.
5. Новиков, И. И. Переходные режимы теплообмена при кипении жидкости / И. И. Новиков // Теплофизика высоких температур. — 1996. — Т. 34., № 1. — С. 162–164.
6. Van Stralen, S. J. D. The mechanism of nucleate boiling in pure liquids and in binary mixtures-part I / S. J. D. Van Stralen // Iht. J. Heat Mass Transfer. — 1966. — Vol. 9. — p. 995–1020.
7. Van Stralen, S. J. D. The mechanism of nucleate boiling in pure liquids and in binary mixtures-part IV Surface boiling/ S. J. D. Van Stralen // Iht. J. Heat Mass Transfer. — 1967. — Vol. 10. — p. 1485–1498.
8. Теплофизика в тепловой и ядерной энергетике / Г. Н. Кружилин [и др.]; под ред. Ю. Г. Назмеева. — Казань : Казан. фил. Моск. энерг. ин-та, 1998. — 338 с.
9. Григорьев, Л. Н. Теплоотдача при кипении бинарных смесей / Л. Н. Григорьев, А. Г. Усманов // ЖТФ. — 1958. — Т. 28, № 2. — С. 325–332.
10. Александров, А. А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара / А. А. Александров, Б. А. Григорьев. — Москва : Издательство МЭИ, 1999. — 168 с.
11. Коллиер, Дж. Введение в ядерную энергетику / Дж. Коллиер, Дж. Хьюитт. — Москва : Энергоатомиздат, 1989. — 253 с.

References

1. Burov, V.D., Dorokhov, E.V., Yelizarov, D.P. Teplovye elektricheskie stantsii. [Thermal stations.] Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2009, 466 p. (in Russian).
2. Nukiyama, S. The maximum and minimum values of the heat Q transmitted from metal to boiling water under atmosphere pressure. Iht. J. Heat Mass Transfer, 1984, vol. 27, pp. 959–970.
3. Bonilla, C. Voprosy teploperedachi v yadernoy fizike. [Issues of heat transfer in nuclear physics.] Moscow: Gosatomizdat, 1961, 314 p. (in Russian).
4. Lykov, E. V. Thermoacoustic effects in surface boiling liquids. Int. J. Heat Mass Transfer, 1972, vol. 15, pp. 1603–1614.
5. Novikov, I.I. Perekhodnye rezhimy teploobmena pri kipenii zhidkosti. [Transient modes of heat transfer under fluid boiling.] Teplofizika vysokikh temperatur, 1996, vol. 34, no. 1, pp. 162–164 (in Russian).
6. Van Stralen, S. J. D. The mechanism of nucleate boiling in pure liquids and in binary mixtures-part I. Iht. J. Heat Mass Transfer, 1966, vol. 9, pp. 995–1020.
7. Van Stralen, S. J. D. The mechanism of nucleate boiling in pure liquids and in binary mixtures-part IV Surface boiling. Iht. J. Heat Mass Transfer, 1967, vol. 10, pp. 1485–1498.
8. Kruzhilin, G.N., et al., Nazmeyev, Y.G., ed. Teplofizika v teplovoy i yadernoy energetike. [Thermophysics in thermal- and nuclear-power engineering.] Kazan': Kazan. fil. Mosk. energ. in-ta, 1998, 338 p. (in Russian).

9. Grigoryev, L.N., Usmanov, A.G. Teplootdacha pri kipenii binarnykh smesey. [Heat transfer under binary mixtures boiling.] Technical Physics, 1958, vol. 28, no. 2, pp. 325–332 (in Russian).

10. Alexandrov, A.A., Grigoryev, B.A. Tablitsy teplofizicheskikh svoystv vody i vodyanogo para. [Tables of thermophysical properties of water and steam.] Moscow: Izdatel'stvo MEI, 1999, 168 p. (in Russian).

11. Collier, J., Hewitt, G. Vvedenie v yadernuyu energetiku. [Introduction to Nuclear Power.] Moscow: Energoatomizdat, 1989, 253 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 10.09.2014
Сдана в редакцию 16.01.2014
Запланирована в номер 28.01.2015

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 535.31, 681.7.06 DOI 10.12737/10387

Угловые селективные характеристики светопропускания решеточного оптического фильтра*

Р. С. Закируллин**
Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Российская Федерация

Angular selective light transmission characteristics of a grating optical filter ***

R. S. Zakirullin**
Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation

Исследованы решеточные оптические фильтры с целью определения степени влияния геометрических параметров решеток на угловые характеристики светопропускания. Решетки образованы чередующимися пропускающими и поглощающими полосами. Относительное расположение двух решеток обеспечивает угловую селективность светопропускания. Для достижения поставленной цели разработан графоаналитический метод, позволяющий рассчитывать угловую характеристику светопропускания фильтра в виде зависимости коэффициента светопропускания от угла падения лучей. Установлено влияние характеристического угла фильтра (данный угол определяет сдвиг решеток на входной и выходной поверхностях), шагов полос (шаг полос на каждой решетке равен суммарной ширине двух соседних чередующихся полос) и кратности шагов (отношение шагов полос входной и выходной решеток) на угловые характеристики светопропускания. В диапазоне углов падения от 0° до 60° характеристики фильтров на участках убывания и возрастания коэффициента светопропускания эквидистантны, линейны и практически симметричны относительно характеристических углов фильтров. При больших углах падения эквидистантность, линейность и симметричность характеристик нарушаются. Полученные закономерности необходимо учитывать при определении геометрических параметров фильтров, удовлетворяющих требуемым для конкретной остекленной конструкции и заранее заданным угловым характеристикам светопропускания. Целесообразно применение фильтра в областях, где требуется регулирование светопропускания при изменении угла падения лучей вследствие движения источника света и/или остекленного объекта друг относительно друга, прежде всего в архитектурном остеклении.

Ключевые слова: оптический фильтр, решетка с чередующимися полосами, графоаналитический расчет, угловая характеристика светопропускания.

The grating optical filters are investigated to determine the degree of impact of the geometric grating parameters on the angular characteristics of the light transmission. The filter consists of a plane-parallel transparent substrate with thin-layer gratings on two surfaces. The gratings are formed by alternating transmitting and absorption bands. The relative position of two gratings provides angular selectivity of the light transmission. A graphic-analytical method is developed to determine the angular characteristic of the filter light transmission in the form of the dependence of the light transmission coefficient on the beams incidence angle. The effect of a filter characteristic angle (this angle determines a shift of the gratings on the input and output surfaces), fringe spacing (fringe spacing on each grating is equal to the total width of two adjacent alternating bands), and fringe ratio (relation of the fringe spacing of the input and output gratings) on the angular characteristics of the light transmission. The filter characteristics in the areas of decreasing and increasing transmittance are equidistant, linear, and symmetrical with respect to the characteristic angles of the filters in the range of the incidence angles from 0° up to 60°. At large incidence angles, equidistance, linearity, and symmetry of the characteristics are violated. The obtained regularities should be considered when determining the geometrical parameters of the filters satisfying the required for the specified glazed construction and the preset angular characteristics of the light transmission. It is advisable to apply the filter in the areas where the light transmission control is needed at the change of the beams incidence angle due to the movement of a light source and/or a glazed object relative to each other, especially in architectural glazing.

Keywords: optical filter, grating with alternating bands, graphic-analytical calculation, angular characteristic of light transmission.

Введение. Классические тонкопленочные многослойные фильтры [1] имеют оптически однородное в каждом слое покрытие поверхности прозрачной среды. Известны неоднородные покрытия с тонкими микропористыми рассеиваю-

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

** e-mail: rustam.zakirullin@gmail.com

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

щими пленками [2], а также с металлическими пленками с квадратными отверстиями размерами порядка длин световых волн [3]. В оптических фильтрах используются дифракционные решетки [4, 5] и фотонные кристаллы [6, 7]. Перспективы применения имеют наноструктурированные метаматериалы [8]. Перечисленные поверхностные и объемные неоднородности являются микро- и наноразмерными, поэтому расчет характеристик фильтров основан на методах физической оптики [9, 10].

Традиционные области применения оптических фильтров — аналоговая кино-, фото- и телевизионная техника, осветительные системы и другие — в последние десятилетия расширились до интерферометрии, спектроскопии, цифровой техники, волоконно-оптических систем связи, анализаторов структуры ДНК и геномов, лазерных систем и т. д. Среди всего многообразия оптических фильтров отсутствуют пропускающие только требуемую и предварительно рассчитанную часть падающего излучения в разных диапазонах углов падения. Разработка такого фильтра основана на новом способе регулирования направленного светопропускания, защищенном патентом Российской Федерации [11].

Устройство, принцип действия и основы расчета фильтра с угловой селективностью светопропускания описаны в [12]. Фильтр состоит из прозрачной плоскопараллельной подложки с тонкослойными решеточными слоями на двух поверхностях. Входная и выходная решетки образованы направленно пропускающими полосами, чередующимися с поглощающими, отражающими или рассеивающими полосами. Аналогично периоду дифракционной решетки каждая решетка фильтра характеризуется шагом полос — суммарной шириной двух соседних полос. Кратность шагов равна отношению шагов полос на входной и выходной решетках. Селективность светопропускания фильтра обеспечивается за счет взаимного расположения направленно пропускающих полос входной и выходной поверхностей — при изменении углов падения меняется доля излучения, проходящего через обе решетки фильтра. Характеристический угол фильтра определяет сдвиг решеток друг относительно друга.

Благодаря миллиметровым и субмиллиметровым ширинам чередующихся полос (размерам поверхностных неоднородностей), в отличие от [2–8], оптические характеристики фильтра можно рассматривать исключительно в пределах геометрической оптики. Соответственно, упрощается и метод расчета этих характеристик по сравнению с известными методами [9, 10]. Графоаналитический метод расчета зависимости коэффициента светопропускания фильтра от угла падения основан на функции смещения преломленного луча [13]. Функция представляет собой угловую зависимость смещения преломленного луча на выходной поверхности фильтра относительно непреломленного луча при нормальном угле падения.

При заранее известной траектории движения источника света относительно фильтра его угловые характеристики можно предварительно адаптировать к изменению углов падения лучей, что отличает этот фильтр от всех существующих. Алгоритм расчета геометрических параметров решеточного оптического фильтра с заданной угловой селективной характеристикой светопропускания представлен в [14, 15]. В [14, 16] описан метод оптимизации фильтрования солнечного излучения оконными конструкциями.

Статья посвящена исследованию влияния характеристического угла фильтра, шагов полос входной и выходной решеток и кратности шагов на угловые характеристики регулирования направленного светопропускания.

Геометрические параметры решеточного фильтра и метод расчета угловых характеристик светопропускания. На рис. 1 приведена расчетная схема плоскопараллельного решеточного фильтра с чередующимися пропускающими и поглощающими полосами (изображены тонкими и толстыми линиями соответственно). Показатель преломления и толщина стекла подложки $n = 1{,}5$ и $s = 4$ мм. Характеристический угол фильтра □$_c$ = 30° (луч при этом угле падения проходит через центры чередующихся полос входной и выходной решеток). Преломленный луч при характеристическом угле фильтра смещается на расстояние l_c. Указаны лучи, преломленные под углами □$_n$, для углов падения от 0° до 90° через каждые 10° и для угла 45°. Эти лучи показывают границы направленного светопропускания через входную решетку фильтра в пределах одного шага полос. Ширины пропускающих и поглощающих полос соответственно равны: $t_1 = 3$ мм и $t_2 = 1$ мм на входной решетке, $t_3 = 2{,}5$ мм и $t_4 = 1{,}5$ мм на выходной решетке. Шаги полос на обеих поверхностях одинаковы: $t_1 + t_2 = t_3 + t_4 = 4$ мм. Кратность шагов равна $(t_1 + t_2) / (t_3 + t_4) = 1$.

При графоаналитическом расчете [12, 13] коэффициент светопропускания Θ плоскопараллельного фильтра рассчитывается по формуле

$$\tau = h / (t_1 + t_2), \quad (1)$$

где h — ширина светопропускания (общая ширина той части пропускающих полос выходной решетки, через которую преломленные лучи проходят направленно в пределах одного шага полос) при данном угле падения Θ.

Ширина светопропускания определяется [13] на основе функции смещения $l(\Theta)$ преломленного луча

$$l = \frac{s \sin\Theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2\Theta}}. \tag{2}$$

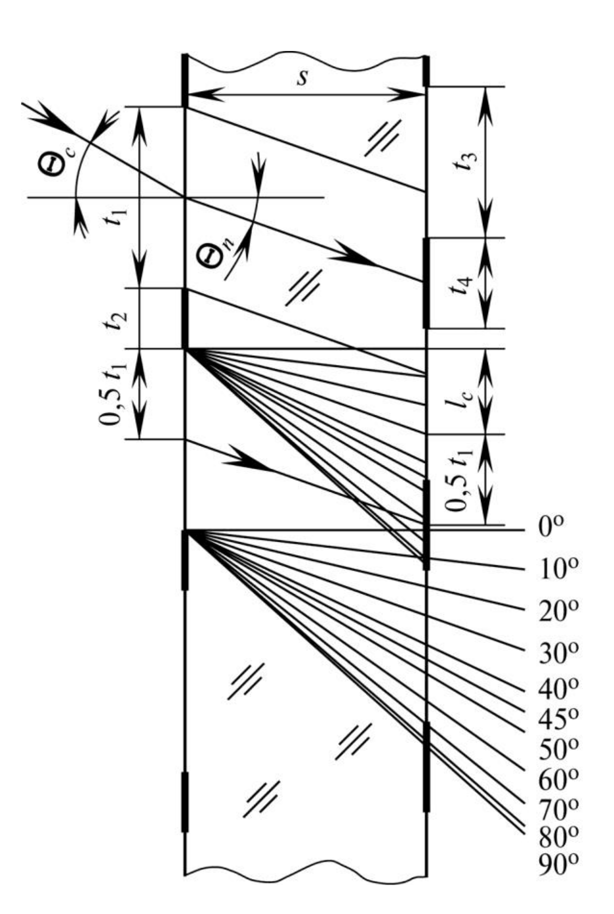


Рис. 1. Расчетная схема решеточного фильтра

При анализе рис. 1 выделены четыре диапазона [12] с одинаковым характером изменения ширины светопропускания (диапазоны разделены экстремальными углами падения, для которых в скобках указаны равенства для точного определения их значений):

1) От 0° до 14,22° ($l = -0{,}5t_1 + 0{,}5t_4 + l_c$) ширина светопропускания уменьшается: $h = 0{,}5t_1 - 0{,}5t_4 + l_c - l$;

2) От 14,22° до 45,55° ($l = 0{,}5t_1 - 0{,}5t_4 + l_c$) ширина светопропускания постоянна: $h = t_1 - t_4$;

3) От 45,55° до 68,53° ($l = -0{,}5t_1 + t_3 + 0{,}5t_4 + l_c$) ширина светопропускания увеличивается: $h = 0{,}5t_1 - 0{,}5t_4 - l_c + l$;

4) От 68,53° до 90° ширина светопропускания постоянна: $h = t_3$.

Точные значения экстремальных углов падения определяются из формулы (2) через функцию арксинус путем подстановки соответствующих вычисленных значений смещений. Коэффициенты светопропускания для углов падения от 0° до 90° рассчитываются по формуле (1) с подстановкой значений ширины светопропускания, полученных по расчетным формулам для каждого из четырех диапазонов регулирования.

В табл. 1 приведены параметры 10 фильтров, коэффициенты светопропускания которых рассчитаны по описанному графоаналитическому методу (параметры рассмотренного фильтра внесены под № 1). Результаты расчета фильтров № 1, № 3, № 7, № 9 и № 10 подтверждены экспериментально [15, 17].

Фильтры № 1–5 в табл. 1 имеют разные характеристические углы, фильтры № 1 и № 6–8 отличаются друг от друга значениями шагов полос на двух решетках. У фильтров № 1, № 9 и № 10 разные кратности шагов. Остальные параметры в каждом из трех случаев одинаковы для всех фильтров. Угловые характеристики фильтров — зависимости коэффициента светопропускания от углов падения — строятся по результатам графоаналитических расчетов.

Таблица 1

Геометрические параметры фильтров

№ фильтра	Характеристический угол Θ_c, град.	Ширина полосы, мм				Шаг полос, мм		Кратность шагов
		t_1	t_2	t_3	t_4	t_1+t_2	t_3+t_4	$\frac{t_1+t_2}{t_3+t_4}$
1	30	3,00	1,00	2,50	1,50	4,0	4,0	1,0
2	10	3,00	1,00	2,50	1,50	4,0	4,0	1,0
3	45	3,00	1,00	2,50	1,50	4,0	4,0	1,0
4	60	3,00	1,00	2,50	1,50	4,0	4,0	1,0
5	80	3,00	1,00	2,50	1,50	4,0	4,0	1,0
6	30	2,00	1,00	1,50	1,50	3,0	3,0	1,0
7	30	3,00	2,00	2,50	2,50	5,0	5,0	1,0
8	30	6,00	2,00	5,00	3,00	8,0	8,0	1,0
9	30	3,00	1,00	1,25	0,75	4,0	2,0	2,0
10	30	3,00	1,00	0,50	0,3	4,0	0,8	5,0

Исследование зависимости коэффициента светопропускания от характеристического угла фильтра. На рис. 2 приведены угловые характеристики светопропускания фильтров № 1–5 с разными характеристическими углами.

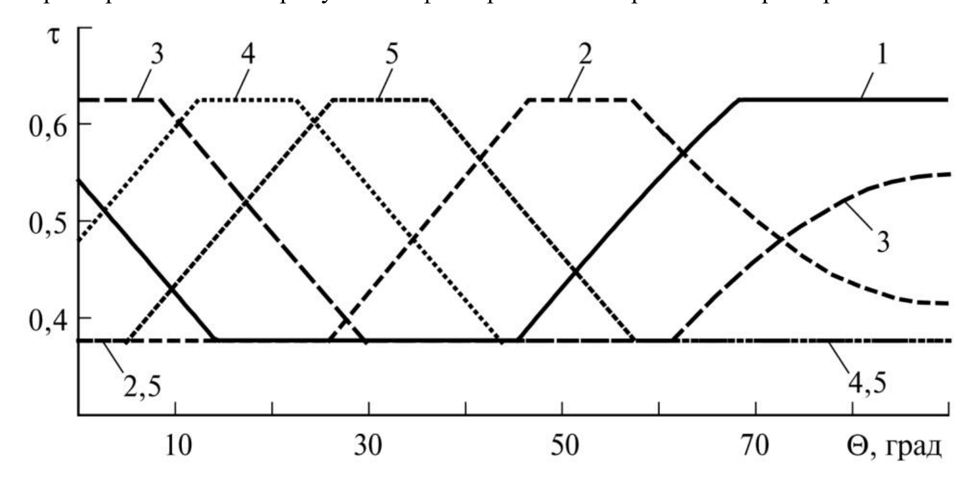


Рис. 2. Угловые характеристики светопропускания фильтров № 1–5 с характеристическими углами 30°, 10°, 45°, 60° и 80° соответственно

В результате графоаналитического исследования зависимости коэффициента направленного светопропускания от характеристических углов фильтров в диапазоне углов падения от 0° до 90° можно сделать следующие выводы.

1. В диапазоне углов падения от 0° примерно до 60° характеристики светопропускания практически эквидистантно сдвигаются по оси абсцисс (углов падения) при изменении характеристического угла. Эквидистантность линий объясняется тем, что в расчетных формулах ширины светопропускания для участков убывания и возрастания на ее изменение влияют только значения смещений преломленных лучей при текущих углах падения, не зависящие от характеристического угла фильтра. При более точном рассмотрении эквидистантность в данном угловом диапазоне

незначительно нарушается из-за нелинейности угловой зависимости смещения преломленного луча в соответствии с формулой (2). При больших углах падения эквидистантность линий нарушается значительно.

2. Участки возрастания и убывания характеристик всех пяти фильтров при углах падения от 0° примерно до 60° практически линейны, при больших углах падения — примерно от 60° до 90° — регулирование в зависимости от угла падения ослабевает — линии или горизонтальны (линии 1, 4 и 5), или искривляются сильнее и становятся более пологими (линии 2 и 3). В расчетных формулах возрастания или убывания ширины светопропускания на ее изменение влияют только величины смещений преломленных лучей, рассчитанных по формуле (2) с синусоидальной зависимостью. А рост значений синусов углов по мере увеличения значений самих углов, как известно, замедляется. Кроме того, изменение разности смещений преломленных лучей в расчетных формулах становится все менее значимым по сравнению с абсолютными значениями ширин чередующихся полос.

3. В диапазоне углов падения от 0° примерно до 60° линии практически симметричны относительно характеристических углов фильтров. Формулы для расчета участков убывания и возрастания ширины светопропускания отличаются только знаками перед величинами смещений преломленного луча при характеристическом и расчетном углах падения ($l_c - l$ и $-l_c + l$). При более точном рассмотрении симметричность в данном угловом диапазоне незначительно нарушается из-за нелинейности зависимости смещения преломленного луча от угла падения в соответствии с формулой (2). При больших углах падения симметричность не соблюдается.

4. Горизонтальные участки характеристик фильтров при минимальном и максимальном светопропускании, находясь в разных угловых диапазонах, совпадают по значениям коэффициента светопропускания по причине одинаковых ширин всех чередующихся полос.

Исследование зависимости коэффициента светопропускания от шагов полос. На рис. 3 приведены угловые характеристики светопропускания фильтров № 1 и № 6–8, имеющих разные шаги полос на обеих решетках.

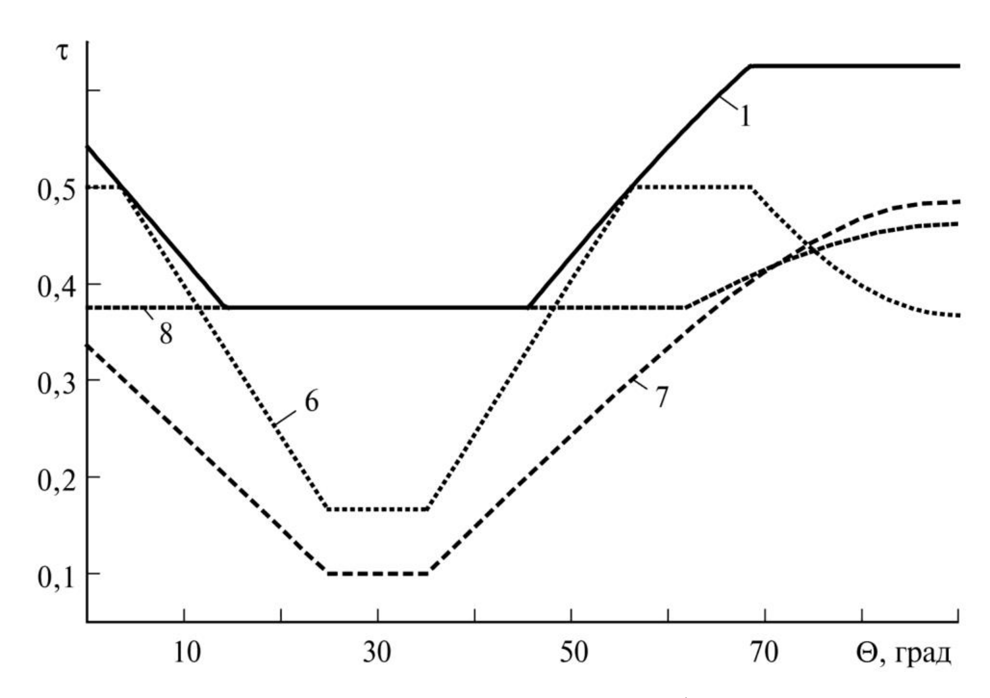


Рис. 3. Угловые характеристики светопропускания фильтров № 1 и № 6–8 с шагами полос 4, 3, 5 и 8 мм соответственно

Сравнение четырех характеристик светопропускания фильтров с разными шагами полос позволяет сделать следующие выводы.

1. Степень углового селективного регулирования (угол наклона участков убывания и возрастания коэффициента светопропускания) при единичной кратности шагов зависит только от значений шагов полос. На рис. 3 угловые характеристики фильтров с возрастанием шагов полос становятся более пологими, т. е. в одном и том же угловом диапазоне коэффициент светопропускания изменяется медленнее. На угол наклона участков убывания и возрастания влияют только значения разности смещений преломленных лучей при характеристическом угле фильтра и при расчетных углах падения. Эти разности в одном и том же угловом диапазоне одинаковы для всех фильтров. Тогда при

расчете по формуле (1) при одинаковом изменении числителя знаменатель с увеличением шага полос возрастает, что приводит к уменьшению изменения коэффициента светопропускания.

2. Сравнение характеристик фильтров № 1 и № 8 показывает, что при увеличении шагов полос на обеих решетках и, следовательно, ширин чередующихся полос (в данном случае оба шага и ширины всех полос увеличены в два раза) ослабляется степень регулирования и расширяются угловые диапазоны с одинаковым характером изменения коэффициента светопропускания. Для заданного показателя преломления материала подложки и ее толщины существуют оптимальные значения шагов и ширин полос, сравнимые со значениями смещений преломленных лучей, и при значительном их превышении регулирование практически прекратится (в расчетных формулах потеряется значимость слагаемых смещений по сравнению со слагаемыми ширин полос).

3. При изменении шагов полос линейность и эквидистантность участков возрастания и убывания всех линий и их симметричность относительно характеристического угла фильтра сохраняются при углах падения от 0° примерно до 60°. При больших углах падения, особенно при приближении к 90°, эти свойства нарушаются.

Исследование зависимости коэффициента светопропускания от кратности шагов. На рис. 4 приведены угловые характеристики светопропускания фильтров № 1, № 9 и № 10 с разной кратностью шагов полос.

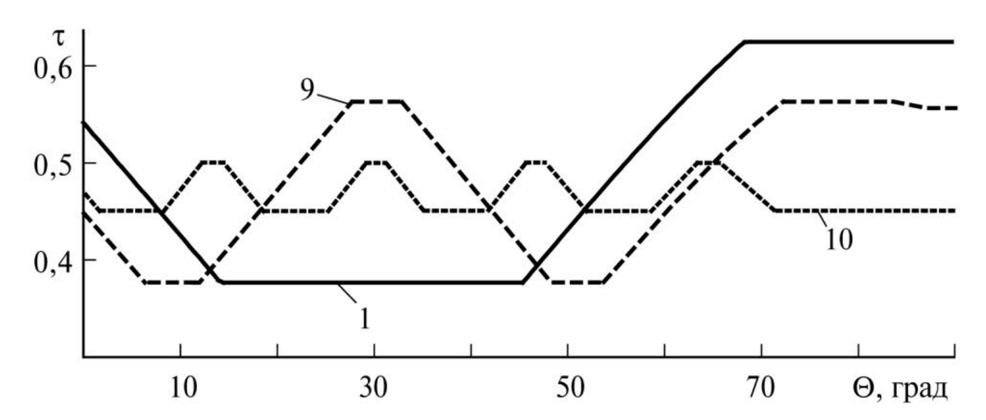


Рис. 4. Угловые характеристики светопропускания фильтров № 1, № 9 и № 10 с кратностью шагов 1, 2 и 5 соответственно

По результатам исследования зависимости светопропускания от кратности шагов можно сделать следующие выводы.

1. Эквидистантность, линейность и симметричность относительно характеристического угла на участках возрастания и убывания характеристик светопропускания в диапазоне углов падения от 0° примерно до 60° сохраняются при изменении кратности шагов полос (по указанным выше причинам).

2. При увеличении кратности шагов сужаются как диапазоны изменения коэффициента направленного светопропускания, так и угловые диапазоны регулирования. Количество «периодов» линий, напоминающих синусоиды, примерно равно кратности шагов. При более точном рассмотрении в данном диапазоне периодичность «волн» регулирования незначительно нарушается из-за нелинейности зависимости смещения преломленного луча от угла падения в соответствии с формулой (2).

Заключение. Исследование решеточных оптических фильтров для определения степени влияния геометрических параметров их решеток на угловые характеристики светопропускания позволяет сделать следующие выводы.

1. В диапазоне углов падения от 0° примерно до 60° характеристики фильтров на участках убывания и возрастания коэффициента светопропускания практически эквидистантны независимо от характеристических углов фильтров и кратности шагов при неизменных шагах полос. При изменении характеристического угла фильтра его характеристики эквидистантно сдвигаются вдоль оси углов падения. Степень углового регулирования зависит только от значений шагов полос — с их увеличением в одном и том же угловом диапазоне коэффициент светопропускания изменяется медленнее. Для заданного показателя преломления материала подложки и ее толщины существуют оптимальные значения шагов и ширин полос, сравнимые со значениями смещений преломленных лучей. При больших углах падения эквидистантность линий нарушается.

2. Участки возрастания и убывания характеристик фильтров при углах падения от 0° примерно до 60° практически линейны. При больших углах падения — примерно от 60° до 90° — степень углового регулирования ослабевает.

3. В диапазоне углов падения от 0° примерно до 60° линии практически симметричны относительно характеристических углов фильтров. При больших углах падения симметричность нарушается.

4. При увеличении кратности шагов сужаются как диапазоны изменения коэффициента светопропускания, так и угловые диапазоны регулирования. Количество «периодов» линий, напоминающих синусоиды, примерно равно кратности шагов.

Полученные закономерности необходимо учитывать при определении геометрических параметров фильтров, удовлетворяющих требуемым для конкретной остекленной конструкции и заранее заданным угловым характеристикам светопропускания.

Целью дальнейших исследований, проводимых в рамках НИР «Разработка оптических фильтров с поверхностными решетками для предадаптированного углового селективного регулирования направленного светопропускания», является поиск технологических решений для обеспечения практического применения полученных результатов. Архитектурное остекление является основной областью предполагаемого применения для регулирования проходящего в помещение светового потока в зависимости от угла падения солнечных лучей при сложной криволинейной траектории движения солнца.

Библиографический список

1. Macleod, H.-A. Thin-Film Optical Filters / H.-A. Macleod. — 4th ed. — Boca Raton : CRC Press, 2012. — 800 p.

2. Microporous phase-separated films of polymer blends for enhanced outcoupling of light from OLEDs / R. Liu [et al.] // Optics Express. — 2011. — Vol. 19. — P. A1272–A1280.

3. Yanzhong, C. Structured lens formed by a 2D square hole array in a metallic film / C. Yanzhong [et al.] // Optics Letters. — 2008. — V. 33. — P. 753–755.

4. Fehrembach, A.-L. Phenomenological theory of filtering by resonant dielectric gratings / A.-L. Fehrembach, D. Maystre, A. Sentenac // The Journal of the Optical Society of America. — 2002. — Vol. A 19, № 6. — P. 1136–1144.

5. Plasmonic critical angle in optical transmission through subwavelength metallic gratings / Z. Wang [et al.] // Optics Letters. — 2011. — Vol. 36, № 23. — P. 4584–4586.

6. Multi-channel and sharp angular spatial filters based on one-dimensional photonic crystals / S. Jiang [et al.] // Chinese Optics Letters. — 2006. — Vol. 4, № 10. — P. 605–607.

7. Wide-field-of-view narrow-band spectral filters based on photonic crystal nanocavities / W. Nakagawa [et al.] // Optics Letters. — 2011. — Vol. 27, № 3. — P. 191–193.

8. Симовский, К. Р. О материальных параметрах метаматериалов / К. Р. Симовский // Оптика и спектроскопия. — 2009. — Т. 107, № 5. — С. 766–793.

9. Mazilu, M. Modular Method for Calculation of Transmission and Reflection in Multilayered Structures / M. Mazilu, A. Miller, V. T. Donchev // Applied Optics. — 2001. — Vol. 40. — P. 6670–6676.

10. Periodic dielectric bars assisted enhanced transmission and directional light emission from a single subwavelength slit / Z.-B. Li [et al.] // Optics Letters. — 2006. — Vol. 14. — P. 8037–8042.

11. Способ регулирования направленного светопропускания : патент 2509324 Рос. Федерация : 6 G02B 5/20, E06B 9/24, G02B 1/10 / Р. С. Закируллин. — № 2012130148 ; заявл. 17.07.12 ; опубл. 10.11.12, Бюл. № 31. — 3 с.

12. Закируллин, Р. С. Способ углового селективного регулирования направленного светопропускания / Р. С. Закируллин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2013. — № 3 (85). — С. 17–22.

13. Закируллин, Р. С. Селективное регулирование направленного светопропускания по углам падения лучей / Р. С. Закируллин // Журнал технической физики. — 2012. — Т. 82, № 10. — С. 134–136.

14. Закируллин, Р. С. Расчет параметров оптического фильтра с угловым селективным светопропусканием / Р. С. Закируллин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2013. — № 5 (87). — С. 54–58.

15. Zakirullin, R. S. Grating optical filter for pre-adapted angular selective regulation of directional light transmission / R. S. Zakirullin // 8th Iberoamerican Optics Meeting and 1th Latin American Meeting on Optics, Lasers and Applications. Proc. SPIE. — 2013. — Vol. 8785. — P. 15.

16. Закируллин, Р. С. Интеллектуальное окно как оптический фильтр с угловым селективным светопропусканием / Р. С. Закируллин // Науч. вестник Воронеж. гос. архитектурно-строит. ун-та. Архитектура и строительство. — 2014. — Вып. 1 (33). — С. 11–19.

17.Закируллин, Р. С. Оптический фильтр с угловой селективностью светопропускания / Р. С. Закируллин // Оптический журнал. — 2013. — Т. 80, вып. 8. — С. 16–24.

References

1. Macleod, H.-A. Thin-Film Optical Filters. 4th ed. Boca Raton : CRC Press, 2012, 800 p.

2. Liu, R., et al. Microporous phase-separated films of polymer blends for enhanced outcoupling of light from OLEDs. Optics Express, 2011, vol. 19, pp. A1272–A1280.

3. Yanzhong, C., et al. Structured lens formed by a 2D square hole array in a metallic film. Optics Letters, 2008, vol. 33, pp. 753–755.

4. Fehrembach, A.-L., Maystre, D., Sentenac, A. Phenomenological theory of filtering by resonant dielectric gratings. The Journal of the Optical *Society* of America, 2002, vol. A 19, no. 6, pp. 1136–1144.

5. Wang, Z., et al. Plasmonic critical angle in optical transmission through subwavelength metallic gratings. Optics Letters, 2011, vol. 36, no. 23, pp. 4584–4586.

6. Jiang, S., et al. Multi-channel and sharp angular spatial filters based on one-dimensional photonic crystals. Chinese Optics Letters, 2006, vol. 4, no. 10, pp. 605–607.

7. Nakagawa, W., et al. Wide-field-of-view narrow-band spectral filters based on photonic crystal nanocavities. Optics Letters, 2011, vol. 27, no. 3, pp. 191–193.

8. Simovski, C.R. O material'nykh parametrakh metamaterialov. [Material parameters of metamaterials: a review).] Optics and Spectroscopy, 2009, vol. 107, no. 5, pp. 766–793 (in Russian).

9. Mazilu, M., Miller, A., Donchev, V.T. Modular Method for Calculation of Transmission and Reflection in Multilayered Structures. *Applied Optics*, 2001, vol. 40, pp. 6670–6676.

10. Li, Z.-B., et al. Periodic dielectric bars assisted enhanced transmission and directional light emission from a single subwavelength slit. Optics Letters, 2006, vol. 14, pp. 8037–8042.

11. Zakirullin, R.S. Sposob regulirovaniya napravlennogo svetopropuskaniya: patent 2509324 Ros. Federatsiya: 6 G02B 5/20, E06B 9/24, G02B 1/10. [Method of regulation for directional light: RF Patent no. 2509324: 6 G02B 5/20, E06B 9/24, G02B 1/10/] RF Patent, 2012 (in Russian).

12. Zakirullin, R.S. Sposob uglovogo selektivnogo regulirovaniya napravlennogo svetopropuskaniya. [Method of angular selective regulation for directional light.] Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2013, no. 3 (85), pp. 17–22 (in Russian).

13. Zakirullin, R.S. Selektivnoe regulirovanie napravlennogo svetopropuskaniya po uglam padeniya luchey. [Selective beam incidence angle control over directional light transmission.] Technical Physics, 2012, vol. 82, no. 10, pp. 134–136 (in Russian).

14. Zakirullin, R.S. Raschet parametrov opticheskogo fil'tra s uglovym selektivnym svetopropuskaniem. [Parameters calculation of optical filter with angular selective light transmission.] Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2013, no. 5 (87), pp. 54–58 (in Russian).

15. Zakirullin, R. S. Grating optical filter for pre-adapted angular selective regulation of directional light transmission. 8th Iberoamerican Optics Meeting and 1th Latin American Meeting on Optics, Lasers and Applications. Proc. SPIE, 2013, vol. 8785, p. 15.

16. Zakirullin, R.S. Intellektual'noe okno kak opticheskiy fil'tr s uglovym selektivnym svetopropuskaniem. [Intelligent window as an optical filter with angular selective transmission.] Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture, 2014, iss. 1 (33), pp. 11–19 (in Russian).

17. Zakirullin, R.S. Opticheskiy fil'tr s uglovoy selektivnost'yu svetopropuskaniya. [Optical filter with angular selectivity of light transmission.] Journal of Optical technology, 2013, vol. 80, iss. 8, pp. 16–24 (in Russian).

Поступила в редакцию 10.09.2014
Сдана в редакцию 23.09.2014
Запланирована в номер 28.01.2015

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.785:669.14.018.29 DOI 10.12737/10388

Повышение эксплуатационных свойств и качества химических покрытий на сталях и сплавах лазерной обработкой*

А. В. Бровер[1], Г. И. Бровер[2], В. Н. Пустовойт[3]**
[1,2,3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Improving quality and performance properties of chemical coatings on steels and alloys by laser treatment ***

A.V. Brover[1], G.I.Brover[2], V.N. Pustovoyt[3]**
[1,2,3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Цель исследований – определение возможности повышения эксплуатационных свойств и качества покрытий скоростной лазерной обработкой на примере системы Ni-P. Использовались оптическая и электронно-зондовая микроскопия, дюрометрический, рентгеноструктурный и микрорентгеноспектральный анализ. В результате проведенных исследований установлено, что лазерное облучение химических покрытий позволяет увеличить твердость поверхностных слоев сталей, повысить прочность сцепления покрытий со стальной подложкой, понизить коэффициент трения и повысить износостойкость сталей с покрытиями. Полученные в работе результаты позволяют обоснованно выбирать режимы лазерной обработки химических покрытий, приводящие к уплотнению и дегазации поверхностных слоев сталей, увеличению адгезии покрытия к основе, улучшению морфологии поверхности, формированию в поверхностных слоях сталей относительно совершенной текстуры, уменьшению выгорания легирующих элементов из поверхностных слоев материалов. В результате проведенных исследований показано, что лазерная обработка химических покрытий повышает качество поверхностных слоев сталей и сплавов, повышает прочность сцепления покрытия с металлической основой, увеличивает твердость, понижает коэффициенты трения, повышает износостойкость сталей с химическими покрытиями.

Ключевые слова: лазерная обработка, химические покрытия, свойства и качество поверхности сплавов.

The subject of this paper is the Ni-P chemical coatings on steels and alloys. The research goal is to determine the capabilities of improving the quality and performance properties of the coatings under the rapid laser processing. Metal physical research methods – optical and electron-probe microscopy, hardness measurement, X-ray and electron microprobe analysis – are used. Anti-friction properties of the irradiated coatings are determined under testing on the tribometer. The study results have shown that the laser irradiation of chemical coatings can increase the hardness of the steel surface layers, advance the adherence strength of the coating to the steel substrate, lower the friction factor, and enhance the wearability of the coated steels.The results obtained allow reasonably choose modes of laser processing for chemical coatings leading to the consolidation and degassing of the steel surface layers, the increase of the coating adhesion to the substrate, the improvement of the surface morphology, the formation of a relatively perfect texture in the steel surface layers, and to the reduction of the burnout of alloying elements from the surface layers of materials.The studies show that the laser treatment of chemical coatings improves the quality of the surface layers of steels and alloys, increases the strength of coating adhesion to the metal substrate, increases the hardness, decreases the friction factor, and increases the wear resistance of steels with chemical coatings.

Keywords: laser machining, chemical coatings, properties and quality of the alloy surface.

Введение. Как известно, химические покрытия на никелевой основе, широко применяемые для повышения износостойкости деталей машин и инструмента, после осаждения имеют недостаточно высокую прочность сцепления с подложкой [1]. В связи с этим появляется необходимость проведения их термообработки. При нагреве на границе покрытие – подложка образуется диффузионный слой, предотвращающий отслаивание покрытий при эксплуатации изделий [2-4].

Традиционно термическая обработка химических покрытий заключается в печном нагреве до температур 300-400°С в течение 1 часа. Такой нагрев приводит к повышению эксплуатационных свойств покрытий, но сопровождает-

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**e-mail: brover@mail.ru, fipm-dstu@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

ся снижением основных свойств изделий в целом в случае изготовления их из углеродистых или низколегированных сталей.

С этой точки зрения перспективным является проведение локальной лазерной термообработки участков изделий с покрытием, подверженных максимальному износу при эксплуатации [5-8].

Для оптимизации процесса лазерного облучения необходимо выяснить степень влияния режимов обработки на строение и основные свойства покрытий на никелевой основе.

Методы исследований. В работе исследованы структурные превращения и влияние их на свойства поверхностных слоев сталей при лазерной обработке покрытий системы Ni-P.

Покрытия наносили на стали Р6М5, Р18, Х12М методом химического осаждения. Металлографический анализ проводился с использованием оптических микроскопов ММУ-3, МИМ-7, “Neophot-21” и сканирующего зондового микроскопа в режиме атомно-силовой микроскопии. Рентгеноструктурные исследования осуществлялись на дифрактометре ДРОН-0,5 в фильтрованном $Fe_{K\alpha}$-излучении. Твердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3 с нагрузкой 0,49Н. Лазерное облучение осуществлялось с использованием технологических лазерных установок типа «Квант» с плотностью мощности излучения 80-250 МВт/м^2. Микрорентгеноспектральный анализ облученных химических покрытий проводился на растровом электронном микроскопе – микроанализаторе РЭММА-200. Определение антифрикционных свойств поверхностных слоев сталей осуществляли на трибометре ТР-5.

Результаты и их обсуждение. Металлографическими исследованиями установлено, что качество формирующихся при лазерной обработке химических покрытий поверхностных слоев, прежде всего, зависит от толщины покрытия и плотности мощности излучения. Экспериментально определено, что оптимальная толщина покрытия должна составлять 10-30 мкм, при увеличении толщины свыше 30 мкм им поглощается большая часть энергии излучения, что снижает эффективность проведения лазерной термообработки. При выборе параметров лазерного облучения химических покрытий обращалось внимание на состояние поверхности образцов после обработки. Так, лазерная термообработка с плотностью мощности свыше 100 МВт/м^2 приводит к образованию кратерообразной зоны с углублением в центральной части пятна. При этом наблюдается растрескивание покрытия почти по всей площади пятна расфокусировки.

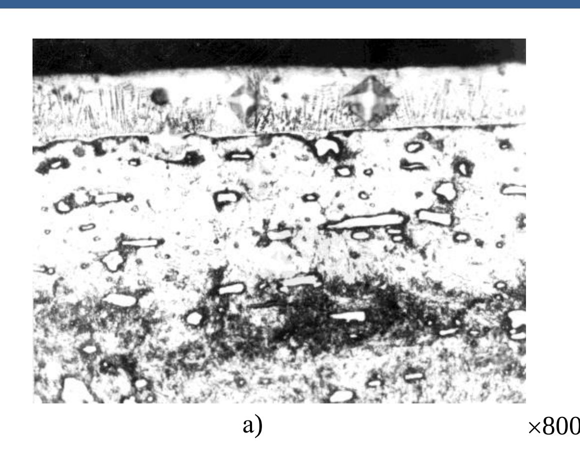
В случае облучения покрытий с плотностью мощности менее 100 МВт/м^2 перечисленные эффекты не наблюдаются. Поверхность приобретает незначительную волнистость, уменьшающуюся по мере снижения плотности мощности излучения. Выбранная плотность мощности излучения позволяет получить качественный поверхностный слой, несмотря на значительную разницу в температурах плавления покрытия и подложки [9].

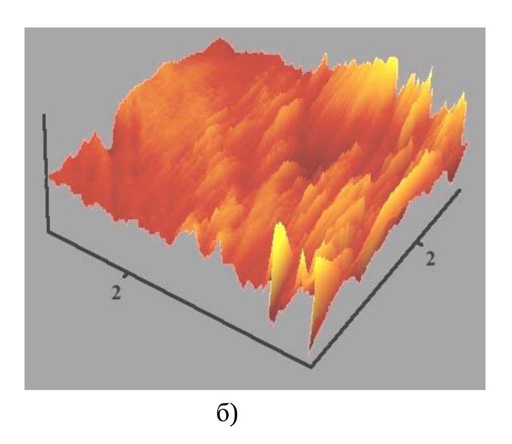
Необходимость учета этого фактора связана с неоднородностью лазерного излучения по облучаемому пятну, что при плотностях мощности свыше 100 МВт/м^2 приводит к локальному оплавлению Ni-P покрытий без расплавления лежащего под ним металла. При этом периферийные участки затвердевшего Ni-P покрытия вне ванны оплавленного покрытия в центральной части могут оказать неблагоприятное воздействие на эффективность лазерного легирования в местах перекрытия пятен облучения.

Макроструктурный анализ показал, что при оптимальных уровнях энергии и длительностях импульса излучения наблюдается ряд положительных эффектов, позволяющих рекомендовать лазерную термообработку для повышения качества химических покрытий на инструментальных сталях. Например, замечено, что лазерное облучение с незначительным оплавлением поверхности (q=90 МВт/м^2) приводит к снижению пористости, к «залечиванию» поверхностных дефектов, микротрещин, к удалению водорода из поверхностных слоев стали, что в совокупности снижает вероятность зарождения трещин и разрушения обработанных образцов и изделий из инструментальных сталей.

Как показали металлографические исследования, поверхностные слои инструментальных сталей после лазерной обработки химических покрытий имеют дендритное строение (рис. 1), глубина облученного слоя составляет при этом 10-30 мкм, микротвердость достигает значений 4-6 ГПа и может быть повышена до 8-9 ГПа последующим отпуском в течение 1 часа при температуре 300^{o}С.

При измерениях твердости замечено, что химически осажденные покрытия даже после нагрева до температур 100-400^{o}С имеют недостаточно высокую прочность сцепления с подложкой, что выражается в образовании сколов покрытий около отпечатков индентора микротвердомера в процессе нагружения. После лазерной термообработки подобные явления не наблюдаются (рис.1,а).



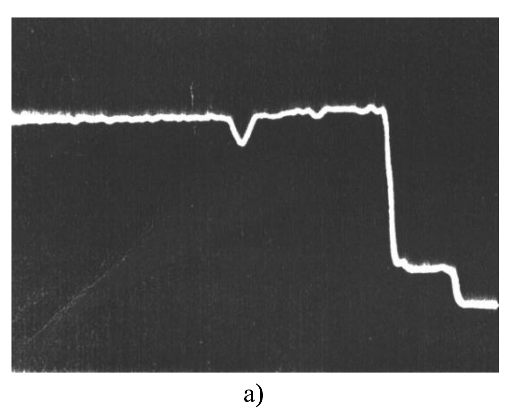


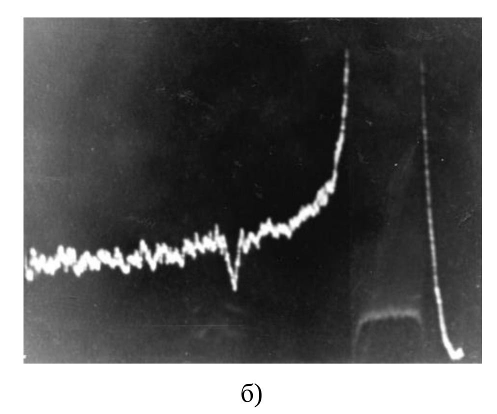
а) ×800 б)

Рис. 1. Дендритное строение покрытий Ni-P, наблюдаемое в оптический микроскоп (поперечное сечение)(а); с использованием сканирующего зондового микроскопа (б) (вид с поверхности покрытия)

Методом нанесения сетки царапин в облученных зонах подтверждено повышение прочности сцепления покрытия с подложкой, то есть адгезионной прочности. Таким образом, появляется возможность замены операции нагрева покрытий после осаждения на их локальную лазерную обработку в местах наибольшего износа.

Подтверждением изложенному служат результаты микрорентгеноспектральных исследований. В частности, сканирование облученных покрытий по железу и никелю (рис. 2) показало, что на границе покрытие-подложка образуется переходной диффузионный слой Fe-Ni, что приводит к увеличению прочности сцепления покрытия с подложкой.





а) б)

Рис. 2. Сканирование облученного образца с покрытием Ni-P по железу (а) и по никелю (б)

Установлено, что со стороны железной основы при этом повышается фон никеля, а на изображениях лазерно-облученных образцов с Ni-P покрытием в рентгеновских NiK_{α}-лучах ясно наблюдается перемешивание никеля и железа в поверхностном слое, что в результате и приводит к увеличению прочности сцепления покрытия с подложкой.

Рентгеноструктурными исследованиями образцов до и после лазерной обработки установлено, что до облучения покрытия системы Ni-P имеют мелкокристаллическую структуру, дающую на дифрактограммах диффузное гало, то есть в покрытиях наблюдаются наноструктурные эффекты (рис. 3, кривая 1). После лазерной обработки с $q>60$ МВт/м^2 на его фоне появляются достаточно четкие линии кристаллических фаз (рис. 3, кривая 2). Для их идентификации контрольный образец с покрытием подвергали отжигу на равновесный фазовый состав.

Сравнение результатов исследований и анализ диаграмм состояния сплавов системы Ni-P показало, что вся совокупность интерференционных линий покрытий после лазерной обработки аналогична линиям дифрактограммы отожженного сплава и представляет собой смесь твердого раствора фосфора в β-Ni и соединения Ni_3P. Отличительной особенностью рентгенограмм покрытий после лазерного облучения является размытие рефлексов присутствующих фаз и смещение их в сторону меньших углов отражения, что свидетельствует об изменении их состава по сравнению с равновесным отожженным состоянием покрытий.

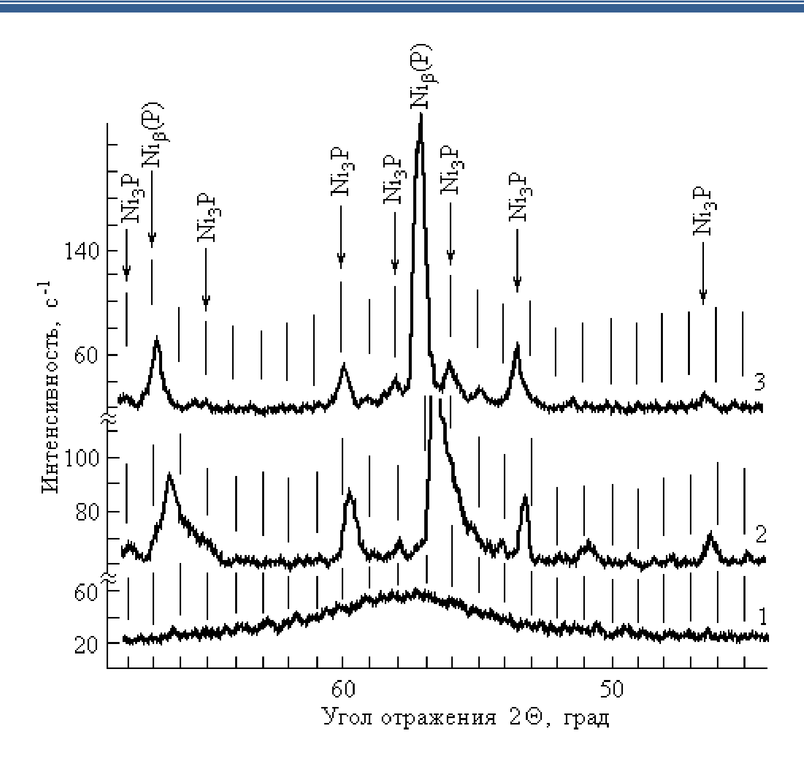
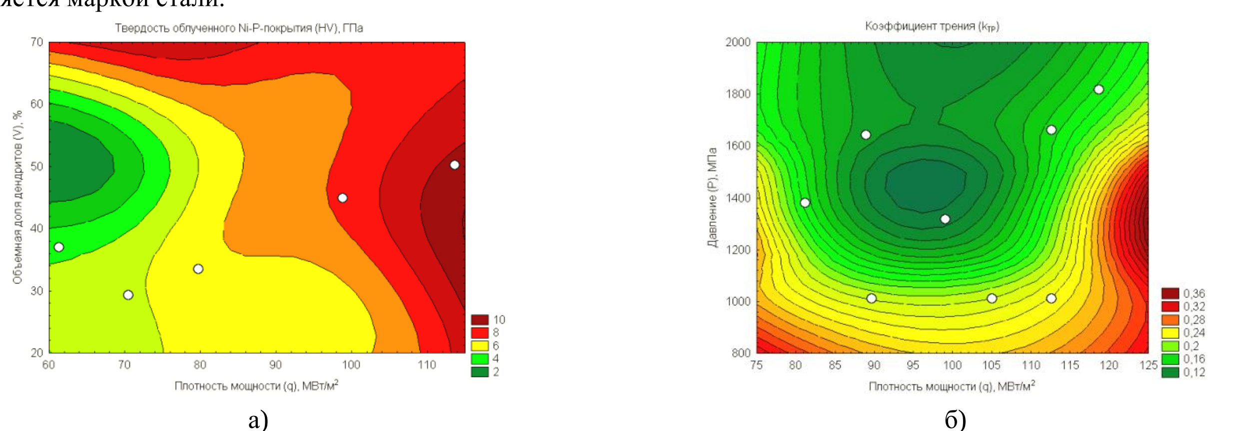


Рис. 3. Фрагменты дифрактограмм Ni-P покрытий на стали Р18 до (1), после (2) лазерной обработки,после объемной термообработки при 400°С (3)

Рентгенографические исследования позволили также установить наличие преимущественной ориентировки структурных составляющих в облученных химических покрытиях, возникающей вследствие направленной кристаллизации подплавленного покрытия на твердой подложке и проявляющейся на рентгенограммах в аномальном соотношении интенсивностей рефлексов никеля. Фиксируемые текстурные эффекты имеют большое значение, поскольку они обусловливают анизотропию основных свойств облученных покрытий. В частности, повышению износостойкости в данном случае способствует то, что тип текстуры (текстура кристаллизации) согласуется с видом напряженного состояния упрочненных изделий в условиях эксплуатации [10]. Предпочтительная ориентация структур лазерной обработки способствует уменьшению взаимодействия трущихся поверхностей, что снижает коэффициент трения по сравнению с традиционным объемным упрочнением.

С целью прогнозирования степени упрочнения и износостойкости химических покрытий после лазерной обработки на разных режимах и выбора оптимального режима облучения для разных условий эксплуатации изделий в работе использовалось статистическое моделирование - строились объемные (трехмерные) номограммы распределения значений искомого параметра с помощью программы статистической обработки данных (рис. 4).

Установлено, что твердость химических покрытий как после лазерной закалки, так и после последующего нагрева при 400°С зависит от плотности мощности излучения и имеет вид кривой с максимумом, положение которого определяется маркой стали.



а) б)

Рис. 4. Твердость (а) и коэффициент трения (б) никелевого покрытия после лазерного облучения с разной плотностью мощности

Например, после лазерной обработки сталей У8А, Р18 твердость поверхностных слоев достигает максимальных значений при плотности мощности излучения 30-40 МВт/м^2, а стали Х12М – при 50-60 МВт/м^2, причем значения твердости на 10-60% выше, чем у покрытий без лазерной обработки. Последующий нагрев при 400^{o}С приводит к смещению максимума твердости в область более низких значений плотности мощности излучения (20-30 МВт/м^2) для всех марок сталей.

В результате определения антифрикционных свойств химических покрытий до и после лазерной обработки можно сделать вывод о понижении коэффициента трения облученных поверхностей образцов в 1,5 раза по сравнению с покрытиями без облучения и в 2,8 раза по сравнению со стальной подложкой. Это связано с такими особенностями их структурно-фазового состояния, как достаточно высокая плотность дефектов кристаллического строения основных фаз, оптимальное соотношение степени завершенности процесса выделения и коагуляции частиц упрочняющих фаз (Ni_3P, Ni_5P_4 и т.д.). После лазерной обработки, как показано выше, увеличивается прочность сцепления покрытия с подложкой, исчезают микропоры и трещины на их границе, что в сочетании с достаточно высокой твердостью поверхностных слоев облученных сталей повышает их эксплуатационные свойства.

Для дальнейшего повышения качества и основных эксплуатационных свойств химических покрытий проведена серия экспериментов по лазерному облучению комбинированных покрытий, состоящих из чередующихся слоев химического покрытия системы Ni-P и твердых обмазок, содержащих порошки легирующих элементов. Перспективность такой комбинации обусловлена тем, что в данном случае химические покрытия выступают в роли матрицы вследствие более высокого сродства никеля к большинству частиц второй фазы, а вплавленные тугоплавкие твердые частицы легирующих компонентов из обмазки придают покрытию высокие значения твердости и износостойкости. Например, вплавление в поверхностные слои сталей частиц Al_2O_3 или WC способствует уменьшению схватывания с контактирующими поверхностями [11].

Следовательно, подбирая состав покрытия, режим и температурный интервал нагрева при лазерной термообработке поверхностных слоев сталей, можно получить гамму структурных композиций, обеспечивающих заданные условиями эксплуатации свойства обрабатываемых изделий.

Выводы:

1. Показано, что лазерная обработка химических покрытий позволяет повысить качество поверхностных слоев сталей за счет уплотнения и дегазации, увеличения адгезии покрытий к основе, улучшения морфологии поверхности; уменьшить выгорание легирующих элементов из поверхностных слоев материалов при скоростной термообработке; формировать в поверхностных слоях сталей относительно совершенную текстуру; регулировать уровень твердости покрытий лазерной обработкой на выбранных режимах.

2. Установлено, что лазерная обработка химических покрытий в 1,5-2 раза увеличивает твердость поверхностных слоев сталей при облучении за счет выделения большого количества дисперсных соединений типа Ni_3P, Ni_5P_4.

3. Лазерная обработка на оптимальных режимах повышает прочность сцепления покрытий со стальной подложкой за счет формирования в переходной зоне твердых растворов системы Ni-Fe, понижает коэффициент трения в 1,5-4,0 раза и повышает износостойкость сталей с химическими покрытиями.

4. Перспективно создание в поверхностных слоях сталей комбинированных покрытий типа керметов (при введении в никелевую основу химических покрытий частиц WC, TiC, α-BN) или самосмазывающихся покрытий (при введении в никелевую матрицу покрытий графита, MoS_2 и т.д.)

Библиографический список

1. Вишенков, С. А. Химические и электротермохимические способы осаждения металлопокрытий / С. А. Вишенков. — Москва : Машиностроение, 1975. — 311 с.

2. Тушинский, Л. И. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий/ Л. И. Тушинский. — Москва : Машиностроение, 1986. — 216 с.

3. Лапшин, О. В. Движение межфазной границы при взаимодействии твердого металла с жидким/ О. В. Лапшин, В. Е. Овчаренко, А. П. Савицкий // Физика и химия обработки материалов. — 1999. — №6. — С. 77–80.

4. Любов, Б. Я. Диффузионные процессы в неоднородных твердых средах/ Б. Я. Любов. — Москва : Наука, 1981. — 296 с.

5. Веденов А. А. Физические процессы при лазерной обработки материалов/ А. А. Веденов, Г. Г. Гладуш.- Москва : Энегроатомиздат,1985. — 224с.

6. Ломаев, Г. В. Упрочняющая обработка поверхности методом высокоскоростной лазерной перекристаллизации/ Г. В. Ломаев, Е. В. Харанжевский Е. В. // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2002. — №3. — С.27–32.

7. Ляхович, Л. С. Лазерное легирование/ Л. С. Ляхович, С. А. Исаков, В. М. Картошкин В. М. // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1987. — №3. — С. 14–19.

8. Вуд, Дж. Быстрозакаленные кристаллические сплавы на основе железа / Дж. Вуд, Р.У. Хоникомб // Сверхбыстрая закалка жидких сплавов. — Москва : Металлургия, 1986. — 375с.

9. Галенко, П. К. Высокоскоростная кристаллизация конструкционной стали при лазерной обработке поверхности/ П. К. Галенко, Е. В. Харанжевский, Д. А. Данилов // Журнал технической физики. — 2002. — Т. 72, вып. 5. — С.48–55

10. Малинов, Л. Е. Армирование поверхности сталей за счет применения дифференцированной обработки/ Л. Е. Малинов, Е. Я. Харианова, А. В. Зареченский // Известия вузов. Черная металлургия. — 1992. — №4. — С. 37–39.

11. Тофпенец, Р. Л. Трансформация дислокационной структуры при изнашивании направленно кристаллизованного сплава Al-4%Cu/ Р. Л. Тофпенец, Л. А. Васильева, И. М. Шевно // Физика металлов и металловедение. — 1984. — Т.58, вып.3. — С.532–536.

References

1. Vishenkov, S.A. Khimicheskie i elektrotermokhimicheskie sposoby osazhdeniya metallopokrytiy. [Chemical and electrothermochemistry methods of metal coatings deposition.] Moscow : Mashinostroenie, 1975, 311 p. (in Russian).

2. Tushinskiy, L.I. Issledovanie struktury i fiziko-mekhanicheskikh svoystv pokrytiy. [Investigation of structure and mechanical-and-physical properties of coatings.] Moscow : Mashinostroenie, 1986, 216 p. (in Russian).

3. Lapshin, O.V., Ovcharenko, V.E., Savitskiy, A.P. Dvizhenie mezhfaznoy granitsy pri vzaimodeystvii tverdogo metalla s zhidkim. [Motion of the interface in the interaction of solid metal and liquid.] Fizika i khimiya obrabotki materialov, 1999, no. 6, pp. 77–80 (in Russian).

4. Lyubov, B.Y. Diffuzionnye protsessy v neodnorodnykh tverdykh sredakh. [Diffusion processes in heterogeneous solid media.] Moscow: Nauka, 1981, 296 p. (in Russian).

5. Vedenov, A.A., Gladush, G.G. Fizicheskie protsessy pri lazernoy obrabotki materialov. [Physical processes under laser material treatment.] Moscow: Enegroatomizdat, 1985, 224 p. (in Russian).

6. Lomayev, G.V., Kharanzhevskiy, E.V. Uprochnyayushchaya obrabotka poverkhnosti metodom vysokoskorostnoy lazernoy perekristallizatsii. [Hardening surface treatment by high-speed laser recrystallization.] Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov, 2002, no. 3, pp. 27–32 (in Russian).

7. Lyakhovich, L.S., Isakov, S.A., Kartoshkin, V.M. Lazernoe legirovanie. [Laser alloying.] Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov, 1987, no. 3, pp. 14–19 (in Russian).

8. Wood, J.V., Honeycombe, R.W.K. Bystrozakalennye kristallicheskie splavy na osnove zheleza. [Rapidly quenched crystalline iron-based alloys.] Sverkhbystraya zakalka zhidkikh splavov. [Rapid quenching of liquid alloys.] Moscow: Metallurgiya, 1986, 375 p. (in Russian).

9. Galenko, P.K., Kharanzhevskiy, E.V. Danilov, D.A. Vysokoskorostnaya kristallizatsiya konstruktsionnoy stali pri lazernoy obrabotke poverkhnosti. [Rapid solidification of structural steel under laser surface treatment.] Zhurnal tekhnicheskoy fiziki, 2002, vol. 72, iss. 5, pp. 48–55 (in Russian).

10. Malinov, L.E., Kharianova, E.Y., Zarechenskiy, A.V. Armirovanie poverkhnosti staley za schet primeneniya differentsirovannoy obrabotki. [Reinforcement of steel surfaces through the use of differentiated treatment.] Izvestia. Ferrous Metallurgy, 1992, no. 4, pp. 37–39 (in Russian).

11. Topfenets, R.L., Vasilyeva, L.A., Shevno, I.M. Transformatsiya dislokatsionnoy struktury pri iznashivanii napravlenno kristallizovannogo splava Al-4%Cu. [Transformation of dislocation structure under wear of direct-crystallized alloy of Al-4% Cu.] The Physics of Metals and Metallography, 1984, vol. 58, iss. 3, pp. 532–536 (in Russian).

Поступила в редакцию 22.09.2014
Сдана в редакцию 23.09.2014
Запланирована в номер 28.01.2015

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 629.083 DOI 10.12737/10389

Поиск новых технологических методов упрочняющей обработки коленчатых валов двигателей*

А. П. Бабичев[1], М. Е. Попов[2], А. Эль Дакдуки[3], Ф. А. Пастухов[4]**
[1, 2, 3, 4]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Search for new technological methods of strengthening treatment of crankshafts***

A.P. Babichev[1], M. E. Popov[2], A. El Dakduki[3], F. A. Pastukhov[4]**
[1, 2, 3, 4]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Цель работы — поиск новых методов упрочняющей обработки коленчатого вала. Исследуются современные эффективные методы (конструктивные и технологические) повышения прочности и износоустойчивости указанной детали. Обозначены особенности основных технологических методов — азотирования, местного наклепывания, обдувки стальной дробью галтелей. Рассмотрена главная задача конструктивных методов повышения прочности — придание коленвалу формы, обеспечивающей более равномерное распределение напряжения по объему детали — как в зонах концентрации напряжений, так и вне этих зон. Требуемые конструктивные формы вала определяются экспериментально. Предложены новые схемы установок для упрочняющей и стабилизирующей виброударной и виброволновой обработки коленчатых валов двигателей. Экспериментально установлено, что виброударная обработка позволяет достичь: равномерного упрочнения поверхностного слоя всех элементов детали; отделки и скругления острых кромок; плавности переходов; исключения поводки нежестких валов, имеющей место при локальной обработке обкатыванием галтелей крупногабаритных деталей.

Ключевые слова: коленчатый вал, технологическая схема, виброволновая обработка, стабилизирующая обработка, упрочняющая обработка.

The work objective is searching new methods of strengthening processing of the cranked shaft. Modern constructive and processing methods of increasing the durability of the engine cranked shaft are considered. Some features of the key processing methods – nitriding, riveting on, steel shot blasting of fillets – are identified. The main task of the constructive methods to increase strength –crankshaft shaping that provides a more uniform stress distribution on shaft volume – both in the stress concentration zones, and outside them is considered. The required design shapes of the shaft are determined experimentally. New installation diagrams for the strengthening and stabilizing vibrowave and shock-vibrating machining of the engine crankshafts are proposed. It is experimentally established that the shock-vibrating machining allows the following: uniform hardening of the surface layer of all part features; sharp edge finishing and rounding; smooth transitions; avoidance of non-rigid shaft distortion that takes place at the local rolling of large part fillets.

Keywords: crankshaft, process flowsheet, vibrowave processing, stabilizing treatment, hardening treatment.

Введение. Актуальными задачами развития технологии машиностроения являются увеличение жизненного цикла автомобильного транспорта, тракторов и сельскохозяйственной техники, улучшение их эксплуатационных характеристик. В значительной степени основные характеристики перечисленных типов изделий определяются прочностью деталей двигателя.

*Работа выполнена в рамках ЕЗН Министерства образования и науки Российской Федерации «Теоретические основы наукоемких технологий повышения качества поверхностного слоя деталей и их долговечности при обработке в гранулированных средах», ГРНТИ 1.17.12.
** e-mail: vibrotech@mail.ru, pme-dgtu@mail.ru, vibrotech@mail.ru, vibrotech@mail.ru
*** The research is done within the frame of the Unified Work Order of the RF Ministry of Education and Science “Theoretical foundations of high-end technologies to improve surface layer quality of the parts and their longevity under treatment in granular media”, State Rubricator of Scientific and Technical Information 1.17.12.

Коленчатый вал (рис. 1) является одной из важных деталей кривошипно-шатунной группы двигателя, и от его качества и прочности зависят эксплуатационные характеристики и долговечность двигателя [1]. Во время работы двигателя коленчатый вал передает крутящий момент трансмиссии, а также различным агрегатам и вспомогательным механизмам.

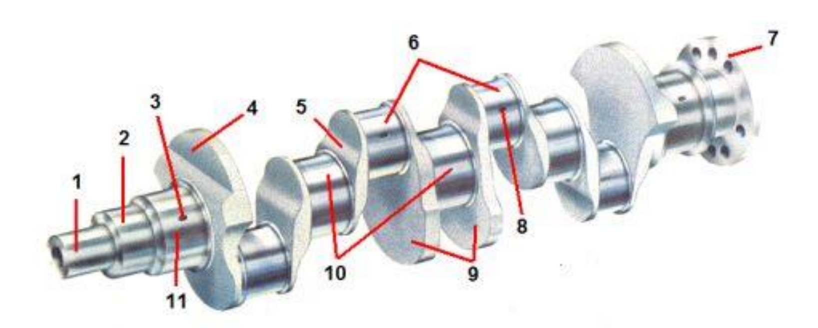


Рис. 1. Коленчатый вал двигателя внутреннего сгорания: 1 — носок коленчатого вала; 2 — посадочное место звездочки (шестерни) привода распределительного вала; 3 — отверстие подвода масла к коренной шейке; 4 — противовес; 5 — щека; 6 — шатунные шейки; 7 — фланец маховика; 8 — отверстие подвода масла к шатунной шейке; 9 — противовесы; 10 — коренные шейки; 11 — коренная шейка упорного подшипника

Коленчатый вал воспринимает периодические нагрузки от сил газов и сил инерции возвратно-поступательно движущихся и вращающихся масс деталей кривошипно-шатунного механизма. Сложная конфигурация вала приводит к появлению в отдельных местах концентрации напряжений, являющейся причиной разрушения.

Силы, периодически действующие на коленчатый вал, вызывают крутильные и изгибные колебания, которые на определенных режимах работы двигателя создают дополнительные напряжения, иногда весьма значительные. Действующие усилия вызывают появление в элементах вала меняющихся в широких пределах напряжений кручения, изгиба, сжатия и растяжения, вследствие чего материал вала работает на усталость. Ввиду того, что коленчатый вал действует в условиях переменных нагрузок, одной из характеристик механических свойств этой детали является усталостная прочность.

Цель работы — представить анализ существующих технологических методов упрочняющей обработки коленчатых валов двигателей и разработать предложения по созданию новых.

Эксплуатационные требования к конструкции коленчатых валов. К конструкции коленчатого вала предъявляют следующие требования:

1) статическая и динамическая уравновешенность;
2) высокие прочность и надежность;
3) малая масса;
4) простота конструкции и большая жесткость;
5) отсутствие резонансов крутильных и изгибных колебаний;
6) высокая точность изготовления (в особенности шатунных и коренных шеек);
7) обтекаемость формы;
8) разгрузка коренных подшипников от центробежных сил и моментов.

Коленчатый вал должен обладать высокой прочностью и жесткостью, высокой износоустойчивостью трущихся поверхностей шеек. На прочность коленчатого вала большое влияние оказывает величина «перекрытия» коренной и шатунной шеек. «Перекрытие» шатунной и коренной шеек представляет собой разность суммы их радиусов и радиуса кривошипа. Если сумма радиусов коренной и шатунной шеек больше радиуса кривошипа, значит, шейки заходят одна за другую. При этом повышается прочность вала, так как увеличивается опасное сечение щеки между шейками. Одновременно возрастает и жесткость вала. Перекрытие шеек обычно имеют короткоходные двигатели с малым отношением хода поршня к диаметру. У современных высокооборотных двигателей отношение близко к единице и имеет тенденцию к дальнейшему снижению.

Конструкционные материалы и заготовки для изготовления коленчатых валов. Требования к коленчатым валам дизелей и газовых двигателей изложены в ГОСТ 10158-62 «Валы коленчатые стальные дизелей и газовых двигателей. Технические требования». В соответствии с этим стандартом валы должны изготавливаться из углеродистых сталей марок 35, 40, 45 и 50Г или из легированных сталей. Твердость шеек, подвергаемых поверхностной закалке, должна

быть не менее 52*HRC* для валов, изготавливаемых из сталей марок 45 и 50Г, и не менее 48*HRC* для валов из легированной стали.

Для изготовления коленчатых валов применяются стали 45, 45А, 40Х, 20Г2 и 50Г. В дизелях, работающих с давлением наддува $p_к$ = 0,15 МН/м^2 (1,5 кГ/см^2), для коленчатых валов используют высоколегированные стали 18ХНМА, 18ХНВА и 40ХНМА с повышенными пределами текучести и прочности. Обычно для производства заготовок стальных коленчатых валов применяется ковка.

Требования к стальным коленчатым валам автомобильных двигателей определяет ГОСТ 4669-68, согласно которому валы должны изготавливаться из стали марок 45, 50Г, 4ОХ, 40ХНМА и 50ХФА. В этом же ГОСТ изложены требования к точности изготовления и чистоте поверхности.

Помимо стальных кованых и штампованных валов применяют также литые валы из высокопрочного чугуна, модифицированного магнием, перлитного ковкого чугуна, легированного никельмолибденового чугуна. Чаще всего для литых коленчатых валов применяют высокопрочный ВЧ 50-1,5 (*НВ* 187-255) и перлитовый чугун. В частности, чугунный коленчатый вал установлен на тепловозном дизеле Д100.

По сравнению со стальными валами чугунные обладают рядом преимуществ:

— меньший расход металла;

— снижение трудоемкости механической обработки за счет сокращения числа операций;

— возможность придания валу форм, обеспечивающих оптимальное распределение металла и повышение усталостной прочности.

При этом литые коленчатые валы из чугуна обладают лучшей способностью гашения крутильных колебаний.

При этом литые чугунные валы обладают меньшей прочностью (особенно на изгиб), чем штампованные стальные валы. Поэтому у чугунных валов увеличивают диаметры шатунных и коренных шеек, толщину щек и радиусы галтелей. Чугунные коленчатые валы изготавливают полноопорными. Шейки чугунных валов имеют высокую износостойкость, что позволяет применять подшипники из свинцовистой бронзы. Масса обработанного литого коленчатого вала на 10–15% меньше массы кованого.

Анализ технологического процесса изготовления коленчатых валов. После ковки коленчатые валы отжигают или нормализуют. Это позволяет снять внутренние напряжения, понизить твердость до *НВ* 163–269 и облегчить механическую обработку. После механической обработки стальные коленчатые валы перед шлифованием подвергают вторичной термической обработке (закалка и отпуск), что значительно улучшает их механические свойства и повышает поверхностную твердость шеек. Обычно вторичная термическая обработка производится с нагревом токами высокой частоты (ТВЧ). Глубина закаленного слоя должна быть не менее 3–4 мм, чтобы после перешлифования шеек коленчатого вала под ремонтные размеры толщина закаленного слоя была не менее 1 мм. Твердость шеек коленчатого вала из стали 50Г — *HRC* 52–62, а из стали 45Г2 — *HRC* 48–50.

Методы упрочнения коленчатых валов. Так как коленчатый вал является высоконагруженной и дорогостоящей деталью, для повышения его прочности и износоустойчивости принимают ряд мер. Способы повышения прочности коленчатых валов делятся на конструктивные и технологические.

Конструктивно повысить прочность коленчатого вала можно следующим образом. Детали придают такую форму, при которой напряжения распределяются по объему более равномерно — как в зонах концентрации напряжений, так и вне этих зон. Требуемые конструктивные формы вала устанавливаются экспериментально.

К технологическим методам повышения прочности коленчатых валов относятся следующие.

1. Азотирование. Предел выносливости при изгибе (для хромомолибденовой стали) повышается на 25–60 %, а при кручении — на 30–40 %.

2. Местное наклепывание путем накатки роликами галтелей и обжатия краев масляного отверстия стальным шариком. Усталостная прочность коленчатых валов при изгибе увеличивается на 40 %, а при кручении — на 20 %.

3. Обдувка стальной дробью галтелей. Предел выносливости при изгибе возрастает до 40 %.

С точки зрения повышения износоустойчивости особенно эффективно азотирование валов, значительно повышающее твердость рабочих поверхностей. Недостаток этого способа — большая продолжительность производственного процесса.

Как известно, большинство стальных коленчатых валов упрочняется путем одновременной обкатки галтелей коренных и шатунных шеек на специальном станке конструкции НИИТСХМ (г. Москва) [2]. Однако конструктивные особенности коленчатых валов: сложная форма, большая длина, низкая жесткость и др. — не позволяют в полной мере эффективно использовать традиционные методы упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД). Так, например, необходимость конструктивной переделки коленчатого вала 01-0401 для форсированного двигателя требует разработки рекомендаций по применению новых прогрессивных методов упрочнения, исключающих деформацию детали и повышающих усталостную прочность и ресурс работы.

Одним из прогрессивных методов упрочнения деталей и изменения их внутренней напряженности является отделочно-упрочняющая обработка с использованием низкочастотных вибраций [3].

В качестве термоупрочнения коленчатых валов 01-0401 применяется метод закалки ТВЧ коренных и шатунных шеек до твердости 52–62 *HRC*э. Однако получение в металле остаточных напряжений и снятие их сопровождается изменением прочностных свойств поверхностного слоя. Согласно [2], основной причиной снижения усталостной прочности коленчатых валов следует считать наличие в зоне галтелей растягивающих (положительных) напряжений, возникающих в результате высокочастотной закалки шеек. Закаленная поверхность шеек не должна распространяться на галтель, так как при этом понижается усталостная прочность вала. Учитывая это обстоятельство, при закалке ТВЧ вала 01-0401 техническими условиями предусматривается отступление закаленного слоя от галтели на 5–8 мм, чтобы расположение эпюры растягивающих остаточных напряжений не могло совпасть с галтелью.

Согласно [4], осуществление закалки шеек с выходом зоны закалки на галтель позволило существенно (более чем в 2 раза) повысить предел выносливости по сравнению с незакаленными образцами. Однако значительное искажение геометрии вала за счет деформации его элементов затрудняет использование этого метода.

Согласно сведениям [1, 2], основными факторами, определяющими пониженную усталостную прочность коленчатых валов, а также ресурс их работы, являются:

— недостаточное качество поверхности галтелей после шлифовки;

— царапины, забоины, низкая шероховатость, нарушение радиуса плавного перехода от галтели к щеке (конструктивный концентратор);

— большое число правок в процессе изготовления коленчатых валов.

Наиболее опасной является усиленная правка (рихтовка) заготовки, т. е. рихтовка валов, вызывающая очень большую остаточную деформацию. Она приводит к появлению остаточных напряжений и микротрещин, которые являются очагами усталостного разрушения.

Шероховатость поверхности шеек не должна быть более:

— R_a 0,2 мкм (9-й класс обработки) — при диаметре до 100 мм;

— R_a 0,4 мкм (8-й класс обработки) — при диаметре свыше 100 мм;

— R_a 0,4 мкм (8-й класс обработки) — для галтелей.

Радиус кривошипа может иметь отклонение от номинального не выше ± 0,15 мм на каждые 100 мм. Смещение углов между коленами относительно любого колена, принятого за базу, составляет ± 30′. С увеличением радиуса кривизны галтели (или углубления галтели в шейку) и перекрытия шатунных и коренных шеек усталостная прочность кривошипа повышается.

При увеличении перекрытия шеек на 10 мм предел выносливости кривошипа при изгибе повышается на 3,5 %; на 20 мм — на 29 %; на 30 мм — на 75 %.

Эксцентричное расположение внутреннего облегчающего отверстия в шатунной шейке относительно ее геометрической оси в сторону удаления от радиуса кривошипа сопровождается уменьшением напряжений изгиба у галтели и повышением усталостной прочности на 10–15 %. Чтобы повысить жесткость таких коленчатых валов на изгиб, увеличивают диаметры шатунных и коренных шеек, уменьшают их длину и увеличивают толщину щек.

В *V*-образных двигателях применяют полноопорные коленчатые валы. Жесткость щеки зависит от перекрытия коренных и шатунных шеек. Чем больше перекрытие шеек, тем больше жесткость и прочность щеки. При этом можно уменьшить толщину щеки без увеличения ее ширины. Величина перекрытия шеек зависит от диаметра шеек и отношения хода поршня к диаметру цилиндра. На усталостную прочность коленчатого вала большое влияние оказывают размеры закруглений (галтелей) на переходах от шеек к щекам. Чтобы избежать возникновения больших концентраций напряжения, переходы (галтели) от щек к коренным и шатунным шейкам выполняют радиусом около $r = (0{,}035 \div 0{,}08) \cdot d$, где d — диаметр коренной или шатунной шейки. Для уменьшения опорной поверхности шейки галтель в некоторых конструкциях состоит из двух-трех сопряженных дуг различных радиусов $r1$, $r2$, $r3$. При неправильно выбранных, слишком малых радиусах галтелей увеличивается концентрация напряжений у перехода от щеки к шейке и снижается запас прочности вала. Чрезмерное увеличение радиусов галтелей невыгодно, так как при этом уменьшается длина рабочей части шейки и возрастают удельные давления на подшипник.

Анализ методов упрочнения, применяемых в промышленности. Основная цель упрочнения — повышение прочности, надежности и несущей способности вала при сохранении конструктивных размеров и марки стали.

В промышленности находят применение различные методы повышения прочности коленчатых валов — такие, как: термическое, термохимическое и механическое упрочнение. К термохимическим и термическим методам упрочнения относятся: азотирование, цементация и поверхностная закалка.

Так, эффективное увеличение циклической прочности коленчатого вала может быть достигнуто путем азотирования [2]. В этом случае усталостная прочность на изгиб увеличивается на 40 %, на кручение — на 30 %. Однако при этом рекомендуется изготавливать валы из хромомолибденовой и других легированных сталей.

Более существенное повышение усталостной прочности можно получить применением химико-термической обработки, в частности низкотемпературного цианирования по методу «Тенифор», который широко применялся в зарубежном дизелестроении [2]. Основным фактором, сдерживающим внедрение этого процесса в отечественном тракторостроении, является применение сильнодействующий ядовитых растворов. Указанные методы не получили распространения на заводах также из-за высокой стоимости обработки и значительных остаточных деформаций коленчатых валов.

Из термических методов наиболее применяемым в производстве является закалка шеек ТВЧ. Однако, по данным Ярославского моторного завода (ЯМЗ) [4], усталостная прочность вала после закалки ТВЧ шеек понижается на 14–17 %.

В результате исследований был предложен способ местной закалки поверхностей шеек коленчатых валов. Указанный ***способ*** включает индукционную поверхностную закалку одновременно шеек и участков плоскостей шеек между коренными и шатунными шейками, причем галтели от шеек к щекам остаются незакаленными.

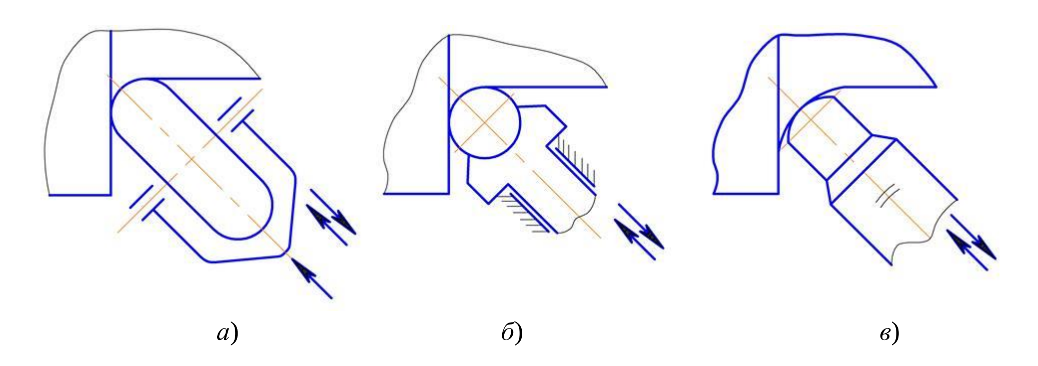


Рис. 2. Чеканка галтелей: упрочнение вибрирующим роликом (*а*); вибрационная гидравлическая чеканка (*б*); упрочнение сферическим бойком (*в*)

Наиболее применяемыми методами упрочнения коленчатого вала являются механические методы упрочнения галтелей:

— наклеп чеканкой (рис. 2);
— дробеструйный наклеп;
— упрочнение вибрирующим роликом;
— упрочнение обкаткой шариками;
— упрочнение обкаткой роликами.

Основой методов является повышение механических показателей поверхностного слоя металла в наиболее напряженных местах вала.

В опытах ЦНИИТМАШ с образцами, упрочненными методом чеканки по термически необработанному металлу, установлено повышение предела выносливости ступенчатых валов [5, 6]. Однако метод не нашел широкого применения в промышленности.

Результаты экспериментов на ЯМЗ по определению эффективности применения дробеструйной обработки дробью диаметром 0,8–1 мм для упрочнения коленчатого вала двигателя, продемонстрировали повышение его усталостной прочности на 25 % [7, 8]. Однако изготовление опытной партии валов показало наличие у дробеструйного наклепа таких недостатков, как низкая производительность, необходимость экранирования поверхности шеек в процессе обработки.

Обкатка галтелей. Физическая сущность метода состоит в следующем. С целью снижения шероховатости поверхности и упрочнения необходимо, чтобы остаточное изменение профиля галтели было ограничено внедрением пуансона на высоту шероховатости.

При этом имеет место «эстафетный» механизм распространения пластической деформации в металле от зерна к зерну и образование пересекающихся плоскостей скольжения. Очаг пластической деформации располагается у поверхности и направлен фронтально вглубь. Поэтому при подаче ролика на глубину шероховатости глубина наклепанного слоя распространяется на 0,2–0,8 мм в основной металл. По данным фирмы «Хайгеншайдт», при глубине наклепа 0,2–0,8 мм предел выносливости коленчатого вала повышается на 40–50 % [9].

Для упрочнения галтелей обкаткой шариками создано несколько конструкций деформирующего приспособления двух видов (рис. 3) [9, 10]:

— упрочняющим инструментом является один шарик, закрепленный в специальном сепараторе;

— галтели упрочняются одновременно несколькими шариками.

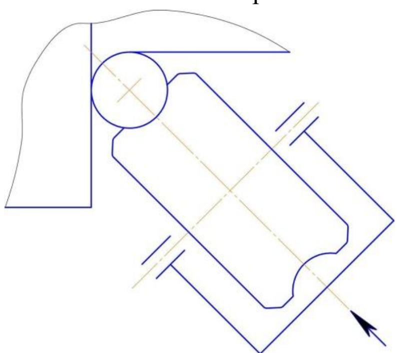


Рис. 3. Упрочнение галтелей обкатыванием шариком

Обкатка галтелей коленчатых валов на Владимирском тракторном заводе с помощью циркулирующих шариков со средним усилием 15000 Н на обойму, показали увеличение усталостной прочности примерно на 85 %.

Однако наличие заедания шариков, закатов металла, неравномерности и ступенчатости профиля накатанных галтелей не позволили рекомендовать метод для широкого использования в промышленности.

Основными схемами для упрочнения галтелей коленчатых валов роликами являются накатки (рис. 4, 5):

— профильными роликами с материальной осью вращения;

— профильными роликами без материальной оси вращения;

— роликами с перемещающейся площадкой контакта.

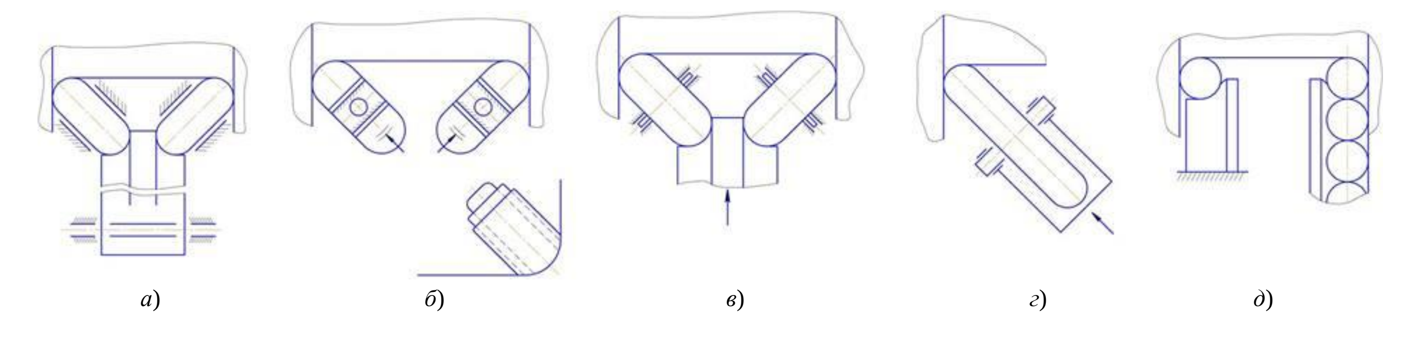


Рис. 4. Упрочнение галтелей обкатыванием роликами: обкатка галтелей раздвижными роликами без материальной оси вращения (*а*); обкатка галтелей роликами с материальной осью вращения (*б*), (*в*), (*г*); обкатка галтелей циркулирующими шариками (*д*)

Варианты упрочнения галтелей с учетом особенностей роликов представлены на рис. 5.

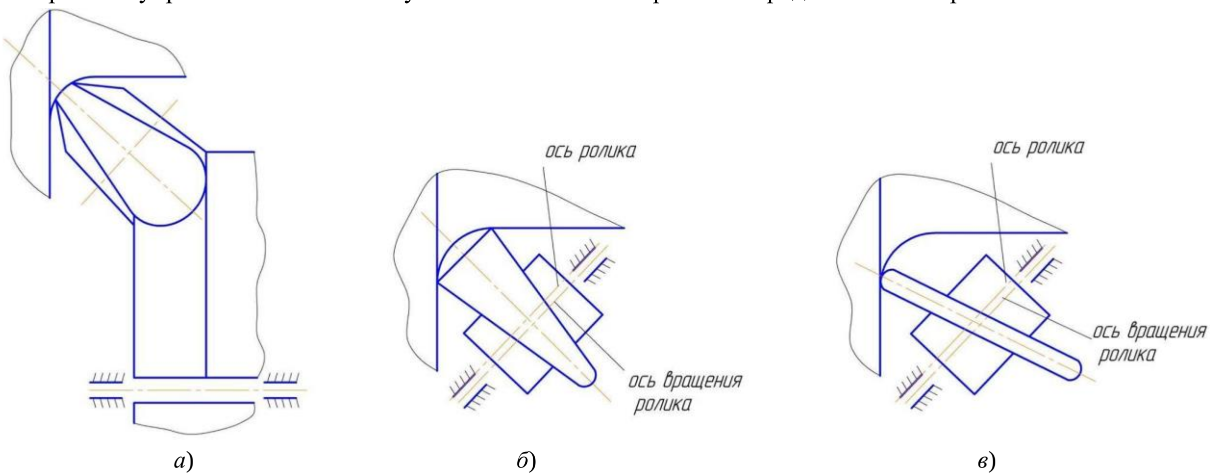


Рис. 5. Упрочнение галтелей обкатывающим роликом: ролик с переменной площадью контакта (*а*); клиновидный ролик (*б*); ролик с биением рабочего профиля с перемещающейся площадкой контакта (*в*)

Согласно данным Московского авиационного технологического института (МАТИ) [9], после обкатки галтелей тремя парами роликов усталостная прочность коленчатых валов двигателей Д-35 и Д-54 возрастает на 50–55 %.

Слабыми сторонами приспособления являются заклинивание и пробуксовывание рабочих роликов, недостаточная жесткость и отсутствие самоцентрирования.

Малые шарики и ролики без материальной оси вращения для накатки галтелей применены фирмой «Хайгеншайдт» [10]. Усталостная прочность после обкатки валов повышается на 50 %. Однако схема накатного устройства нетехнологична и сложна. Ее недостатки:

— накатные ролики характеризуются низкой стойкостью;

— требуется повышенная точность профиля галтелей и минимальные биения шеек вала.

Применение обкатных роликов с перемещающейся площадкой контакта повышает эффективность за счет увеличения удельных давлений.

По данным фирмы «ФУТ Бэрт» (США), повышение усталостной прочности коленчатых валов достигает 40 %.

Однако сложность конструкции, изготовления и доводки накатных роликов, большие затраты на оборудование для точной чистовой шлифовки и дефицитность этого оборудования являются основными недостатками применения роликов с переменной площадкой контакта.

Результаты испытаний упрочненных обкаткой роликами коленчатых валов двигателей ЯМЗ № 238 на Ярославском моторном и Владимирском тракторном заводах показали значительное увеличение усталостной прочности — до 70 %. Однако при больших усилиях обкатки возникают значительные деформации валов, возрастают длина вала и биение коренных шеек, нарушается параллельность образующих шатунных шеек [5].

Согласно исследованиям [9, 10], накатка галтелей коленчатых валов двигателя А-41 из стали 45 показала повышение усталостной прочности на 15 %, а накатка коленчатых валов двигателей Д-240 — на 30 %. Установлены основные условия снижения усталостной прочности валов, а именно:

— отклонения в структуре металла вследствие упрочнения;

— состояние поверхности после накатки;

— разброс механических свойств упрочненного поверхностного слоя.

На Минском, Алтайском и Харьковском моторных заводах был внедрен метод гидродинамического упрочнения галтелей коленчатых валов [10] на полуавтомате конструкции НИИТСХМ. Это оборудование позволяет одновременно упрочнять накаткой роликами все шейки вала со строго регламентированной силой на каждую пару галтелей.

Проверка эффективности процесса на натурных коленчатых валах тракторных двигателей СМД-60, Д-50 показала, что при рациональных режимах упрочнения усталостная прочность коленчатых валов может быть увеличена в два раза за счет:

— снижения шероховатости поверхности;

— повышения глубины и степени наклепа;

— увеличения остаточных напряжений в 1,3–1,5 раза относительно статического накатывания.

При этом установлено, что после гидродинамического упрочнения коленчатых валов и последующей правки их со стрелой остаточного прогиба 0,1–0,2 мм усталостная прочность на 60–70 % превышает усталостную прочность ненакатанных валов.

Однако у данного метода есть недостатки, которые приводят к перенаклепу поверхностного слоя галтелей и преждевременному выходу из строя роликов:

— несовпадение геометрии галтели с геометрией обкаточных роликов на накатном станке;

— недостаточная чистота исходной поверхности;

— резкие изменения в гидросистеме.

Исследованиями НИИТСХМ было также установлено, что метод накатки галтелей не может быть применен при обработке нежестких коленчатых валов типа 01-0401, ввиду появления в них пространственной деформации элементов (возникает значительное биение коренных шеек), требующей длительной и трудоемкой рихтовки и вконечном итоге снижающей усталостную прочность вала.

Наличие большого коробления вала 01-0401 (свыше 0,1 мм) после обкатки галтелей можно объяснить двумя факторами. Первый — технологическая наследственность, определяемая неблагоприятным распределением остаточных напряжений при механической и термической обработке. Второй — влияние зонного характера упрочнения — обкатка только галтелей и создание в них дополнительных остаточных напряжений, приводящих к значительной деформации элементов нежестких валов.

В работе [5] экспериментально подтверждена возможность ликвидации холодных правок в процессе механической обработки и устранения деформаций коленчатых валов при упрочнении за счет комплексного применения высокотемпературного и низкотемпературного отпусков. Однако ввиду отсутствия оборудования для отпуска валов

большой длины типа 01-0401 данная схема термообработки коленчатых валов пока не нашла применения в промышленности.

Указанное обстоятельство требует поиска новых эффективных методов упрочнения нежестких коленчатых валов, позволяющих одновременно с повышением усталостной прочности получить минимальную (в пределах 0,03 мм) деформацию вала за счет стабилизации остаточных напряжений.

Один из методов ППД, позволяющих провести равномерное упрочнение всей поверхности коленчатого вала и повысить релаксационную стойкость материала, — виброобработка [3]. В последние годы получили распространение методы виброударной и виброволновой упрочняющей обработки.

Перспективы применения виброволновой обработки коленчатых валов. После изготовления коленчатых валов 01-0401 для повышения их усталостной прочности требуется проведение упрочняющей операции. Это позволяет исключить повышение деформации вала. С учетом анализа конструктивных особенностей валов и особенностей процесса виброобработки взамен ППД методом обкатки галтелей разработаны схемы объемной вибрационной отделочно-упрочняющей обработки, позволяющие провести:

— стабилизацию валов (рис. 6, *а*, *б*, *в*);

— упрочнение всей поверхности со стабилизацией напряжений (рис. 6, *а*);

— упрочнение (рис. 6, *б*).

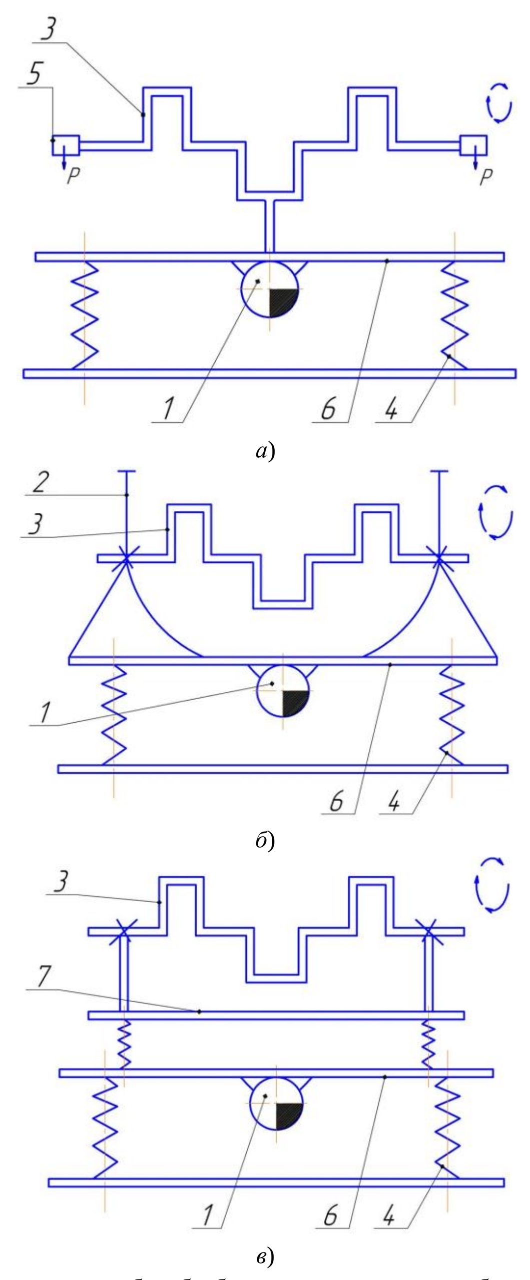


Рис. 6. Экспериментальные схемы виброобработки для проведения стабилизации коленчатых валов:
1 — вибратор; 2— рабочая камера; 3 — коленчатый вал (детали); 4 — пружина; 5 — груз; 6 — платформа I; 7 — платформа II

В основу схемы виброобработки (рис. 6, *а*) положен эффект наложения на фиксированный коленчатый вал вибраций (создаются вибратором камеры и приводят дополнительно к колебаниям вала в поперечном к оси направлении) с одновременным ударным воздействием рабочих тел (шаров) на всю его обрабатываемую поверхность.

Характерные особенности схем виброобработки:

— в схемах (рис. 6) вал жестко крепится к виброплощадке или к стенке вибрирующей камеры с возможностью фиксированного поворота вокруг оси;

— в схеме (рис. 6, *б*) вал с камерой не связан и установлен на опорах, находящихся вне зоны обработки;

— в схеме (рис. 6, *в*) используется двойная виброплатформа;

— схемы (рис. 6) целесообразно реализовать перед окончательной обработкой коленвала — операциями шлифования и полирования шеек;

— схемы (рис. 6, *а*, *б*) после окончательной обработки коленчатого вала.

В качестве рабочих сред для обработки валов по схемам (рис. 6, *а*, *б*) могут быть использованы шары диаметром 9–10 мм.

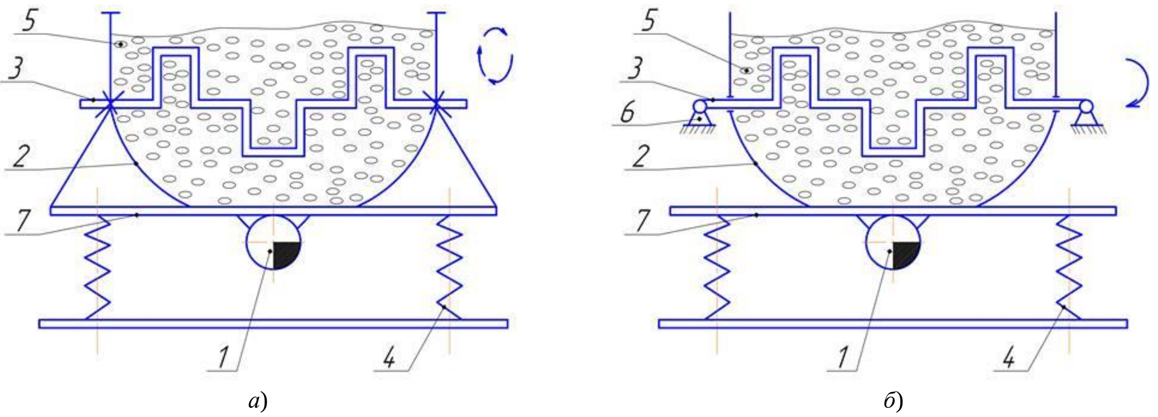
В целом, метод вибростабилизации на нескольких резонансных частотах с применением накладных вибраторов является довольно эффективным. Но, несмотря на это, следует отметить, что сложность и нежесткость коленчатых валов 01-0401 требует, соответственно, сложных схем реализации данного метода и специального оборудования типа установки «Мартин инжиниринг». В настоящее время в условиях Донского государственного технического университета создать такие условия довольно сложно. При этом следует отметить, что данным методом создается только стабилизирующий эффект.

Использование указанных различных конструктивных схем процесса виброударной обработки на виброустановке обычной конструкции со специальной оснасткой позволяет обрабатывать коленчатые валы. При этом возможно совмещение стабилизирующего эффекта с упрочнением путем равномерного и одновременного наклепа всей поверхности вала (включая щеки).

Для проведения экспериментальных исследований по виброупрочнению коленчатых валов различной конструкции был дан анализ целесообразности указанных схем обработки.

Можно сказать, что обработка согласно схемам крепления вала (рис. 6) дает стабилизирующий эффект, но не улучшает качество поверхностного слоя и не упрочняет его. При этом если речь идет о промежуточной операции, то требуется дальнейшая механическая обработка, которая может указанный эффект уменьшить или ликвидировать.

Обработка коленчатых валов согласно схемам, представленным на рис. 7, является оптимальной, т. к. вал окончательно обработан и конечная операция (виброобработка) позволяет улучшить качество поверхности, упрочняя поверхностный слой.



а) *б*)

Рис. 7. Экспериментальные схемы виброобработки коленчатых валов для проведения упрочнения всей поверхности со стабилизацией напряжений (*а*); только для проведения упрочнения всей поверхности (*б*):
1 — вибратор, 2 — рабочая камера, 3 — деталь, 4 — пружина, 5 — рабочая среда, 6 — опора, 7 — платформа

Обработка по данной схеме (рис. 7, *а*) позволяет одновременно с упрочнением поверхностного слоя вала создать определенный стабилизирующий эффект, что может существенным образом сказаться на повышении усталостной прочности детали. При этом проведение последующих операций не требуется.

Результаты анализа различных вариантов обработки свидетельствуют о целесообразности использования схем, приведенных на рис. 7. Именно они были приняты в качестве основных при проектировании экспериментального образца оборудования для проведения исследовательских испытаний коленчатых валов 01-0401.

Виброударная обработка коленчатых валов тракторных и судовых двигателей осуществляется в рабочей камере объемом 100 и 350 дм^3. Каждый вал, размещенный в специальном зажимном приспособлении, вращается вокруг своей оси под динамическим воздействием рабочей среды и ее циркуляционного движения. Это позволяет равномерно обрабатывать поверхности детали. Приспособление жестко крепится к стенкам рабочей камеры, т. е. была выбрана схема, обеспечивающая наибольшую интенсивность процесса. В качестве рабочей среды использовалась смесь стальных шаров диаметром 8–12 мм. Продолжительность процесса при A = 3 мм и f = 25 Гц составила 60 минут. При этом достигается:

— равномерное упрочнение поверхностного слоя всех элементов детали;

— отделка и скругление острых кромок;

— плавность переходов;

— исключение поводки нежестких валов, имеющей место при избирательной обработке обкатыванием галтелей крупногабаритных деталей.

Сравнительные испытания усталостной прочности исходных и упрочненных валов проводились на специальном стенде в институте АН БССР. Виброударная упрочняющая и стабилизирующая обработка крупногабаритных нежестких коленчатых валов дизелей выполнена и апробирована совместно с ОАО «Барнаултрансмаш». С целью повышения качества и долговечности коленчатых и распределительных валов автомобильных и тракторных двигателей аналогичные работы проводились на Минском моторном заводе и Саратовском заводе «Автотракторозапчасть».

Заключение. Анализ практики изготовления и эксплуатации коленчатых валов позволяет сделать следующие выводы.

1. Для изготовления коленчатых валов двигателей тракторов и сельхозмашин чаще всего используется сталь 45. Заготовки вала 01-0401 получаются методом штамповки из круглого проката.

2. Технологический процесс механической обработки коленчатого вала 01-0401 весьма сложен и включает 5 правок. Это обусловлено значительным короблением вала в процессе изготовления, что, естественно, сказывается на снижении его усталостной прочности и ресурса работы.

3. Термообработка коленчатого вала 01-0401 предполагает закалку методом ТВЧ только шеек на 50–52 *HRC*э. Вследствие этого в переходной зоне (близко к галтели) возникают растягивающие напряжения, влияющие на усталостную прочность вала.

4. При эксплуатации излом вала происходит по щеке. При этом галтель шейки нередко является местом возникновения усталостной трещины. Это объясняется пластической деформацией при изгибе вала, отклонениями по шероховатости поверхности, напряжениями растяжения.

5. Результаты анализа литературных источников и исследований показали следующее. Для повышения ресурса работы коленчатых валов двигателей в сельхозмашиностроении в качестве упрочняющей операции наиболее широко применяется накатка галтелей одновременно всех коренных и шатунных шеек на станках конструкции НИИТСХМ.

6. В НИИТСХМ экспериментально установлено, что накатка галтелей нежесткого вала 01-0401 не дает положительных результатов, ввиду значительных пространственных деформаций его элементов.

7. Большая поводка вала 01-0401, вероятно, обусловлена влиянием технологической наследственности. Кроме того, в данном случае имеет значение и зонный характер упрочнения. Пластически деформируются только поверхности галтелей, и в них создаются дополнительные остаточные напряжения, значительно изменяющие общую пространственную картину напряженности элементов нежесткой детали и приводящие к потере продольной устойчивости вала.

Библиографический список

1. Баранова, Н. В. Коленчатые валы тракторных двигателей повышенной надежности и долговечности: обзор / Н. В. Баранова. — Москва : НИИТракторосельхозмаш, 1965. — 68 с.

2. Булыгин, Ю. С. Состояние и перспективы повышения усталостной прочности коленчатых валов двигателей тракторов и сельскохозяйственных машин / Ю. С. Булыгин, З. М. Ройфберг, В. А. Таранта. — Москва : ЦНИИТЭИтракторосельхомаш, 1974. — 61 с. — (Производство и технология).

3. Бабичев, А. П. Основы вибрационной технологии / А. П. Бабичев, И. А. Бабичев. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 1999. — 621 с.

4. Головин, Г. Ф. Остаточные напряжения, прочность и деформации при поверхностной закалке ТВЧ / Г. Ф. Головин. — Ленинград : Машиностроение, 1973. — 144 с.

5. Деформирующая обработка валов / С. А. Зайдес [и др.] ; под ред. С. А. Зайдеса. — Иркутск : Издательство ИрГТУ, 2013. — 452 с.

6. Обработка деталей поверхностным пластическим деформированием / И. Р. Асланян [и др.] ; под ред. С. А. Зайдеса. — Иркутск : Издательство ИрГТУ, 2014. — 560 с.

7. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / под ред. М. А. Мейерса, Л. Е. Мура. — Москва : Металлургия, 1984. — 512 с.

8. Структура и механические свойства аустенитной хромомарганцовистой стали после нагружения ударными волнами / И. Н. Гаврильев [и др.] // Физика металлов и металловедение. — 1988. — Т. 65, вып. 4. — С. 801–803.

9. Высокоскоростное взаимодействие тел / В. М. Фомин [и др.]. — Новосибирск : Издательство СО АН РАН, 1999. — 600 с.

10. Берштейн, Г. Ш. Технология и оборудование для упрочнения коленчатых валов без поводок / Г. Ш. Берштейн // Повышение прочности и долговечности деталей машин ППД. — Москва : НИИИНФОРМТЯЖ-МАШ, 1970. — С. 27–37.

References

1. Baranova, N.V. Kolenchatye valy traktornykh dvigateley povyshennoy nadezhnosti i dolgovechnosti: obzor. [Crankshafts of tractor engines of increased reliability and durability: a review.] Moscow: NIITraktorosel'khozmash, 1965, 68 p. (in Russian).

2. Bulygin, Y.S., Royfberg, Z.M., Taranta, V.A. Sostoyanie i perspektivy povysheniya ustalostnoy prochnosti kolenchatykh valov dvigateley traktorov i sel'skokhozyaystvennykh mashin. [Condition and prospects for improving the fatigue strength of tractor engines and agricultural machinery crankshafts.] Moscow: TsNIITEItraktorosel'khomash, 1974, 61 p. (Production and technology) (in Russian).

3.Babichev, A.P., Babichev, I.A. Osnovy vibratsionnoy tekhnologii. [Fundamentals of vibration technology.] Rostov-on-Don, DSTU Publ. Centre, 1999, 621 p. (in Russian).

4. Golovin, G.F. Ostatochnye napryazheniya, prochnost' i deformatsii pri poverkhnostnoy zakalke TVCh. [Residual stress, strength, and strain under the surface HFC hardening.] Leningrad: Mashinostroenie, 1973, 144 p. (in Russian).

5. Zaides, S.A., ed., et al. Deformiruyushchaya obrabotka valov. [Deforming processing of shafts.] Irkutsk: Izdatel'stvo IrGTU, 2013, 452 p. (in Russian).

6. Aslanyan, I.R., et al., Zaides, S.A., ed. Obrabotka detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem. [Part cutting by surface plastic deformation.] Irkutsk: Izdatel'stvo IrGTU, 2014, 560 p. (in Russian).

7. Myers, M.A., Murr, L.E., eds. Udarnye volny i yavleniya vysokoskorostnoy deformatsii metallov. [Shock waves and phenomena of high-speed deformation of metals.] Moscow: Metallurgiya, 1984, 512 p. (in Russian).

8. Gavrilyev, I.N., et al. Struktura i mekhanicheskie svoystva austenitnoy khromomargantsovistoy stali posle nagruzheniya udarnymi volnami. [Structure and mechanical properties of austenitic chord-manganese steel after shock wave loading.] The Physics of Metals and Metallography, 1988, vol. 65, iss. 4, pp. 801–803 (in Russian).

9. Fomin, V.M., et al. Vysokoskorostnoe vzaimodeystvie tel. [High-speed interaction of bodies.] Novosibirsk: Izdatel'stvo SO AN RAN, 1999, 600 p. (in Russian).

10. Berstein, G.S. Tekhnologiya i oborudovanie dlya uprochneniya kolenchatykh valov bez povodok. [Technology and equipment for hardening crankshafts without distortion.] Povyshenie prochnosti i dolgovechnosti detaley mashin PPD. [Increasing the strength and durability of PMP machine parts.] Moscow: NIIINFORMTYaZhMASh, 1970, pp. 27–37 (in Russian).

Поступила в редакцию 23.07.2014
Сдана в редакцию 24.07.2014
Запланирована в номер 28.01.2015

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК.669.041 DOI 10.12737/10390

О взаимосвязи теплообмена и режима обжига при производстве извести во вращающейся печи*

А. А. Ансимов[1], Э. Э. Меркер[2], А. Ю. Кем[3]**
[1,2] Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова (филиал) НИТУ «МИСиС», г. Старый Оскол, Российская Федерация
[3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

On heat exchange – burning conditions relation in manufacturing lime in a rotary kiln ***

A. A. Ansimov[1], E. E.Merker[2], A. Y. Kem[3]**
[1,2] Stary Oskol Technological Institute after A.A.Ugarov (NITU "MISiS" branch), Stary Oskol, Russian Federation
[3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью данной работы является исследование влияния температурных условий режима обжига известняка во вращающейся печи на показатели качества промышленной извести, используемой в сталеплавильном производстве. Предложена методика изучения условий теплообмена и характера изменения температуры сыпучего материала при распространении теплоты и температурных волн в полуограниченном пространстве вращающейся печи. Показано, что система уравнений, описывающих граничные условия процесса нагрева известняка лучистым тепловым потоком, значительно усложняется в случае параллельно действующего конвективного теплообмена. Для упрощения расчетов предложено совместный лучистый и конвективный теплообмен свести к конвективному (по форме), используя известные критериальные зависимости. Представлены результаты исследования теплообмена в системе «факел — известняк» с определением эффективной и оптимальной температур в зоне обжига. Экспериментально в лабораторных и производственных условиях установлено воздействие температурного режима во вращающейся печи на показатели качества извести. Установлена обусловленность шлакового режима расходом извести при электроплавке стали в дуговой печи. Сформулированы выводы о влиянии параметров тепловой работы печи на основные технологические процессы обжига карбонатного сырья при производстве промышленной извести. Определены оптимальные условия температурного режима печи для производства качественной извести с содержанием более 90 % CaO.

Ключевые слова: режим обжига, вращающаяся печь, промышленная известь, качество, тепловой поток, критериальные зависимости, теплообмен, сталеплавильное производство, электроплавка, дуговая печь, шлакообразование.

The work objective is to study the effect of the temperature lime burning conditions in a rotary kiln on the quality indices of the industrial lime used in the steelmaking. The methodology for studying the heat transfer conditions and the temperature behavior of the bulk material under the heat passage and temperature-waves propagation in the semibounded space of a rotary kiln is offered. It is shown that a system of equations describing boundary conditions of the limestone heating by the radiant heat flux becomes increasingly complicated in the case of the parallel convective heat transfer. To simplify the calculations, it is suggested to reduce the combined radiant and convective heat transfer to the convective one (in form) using the known criterial dependences. The investigation results of the heat transfer in the 'flame – limestone' system with testing apparent and optimum temperatures in the burning zone are presented. The thermal effect in the rotary kiln on the lime quality indices is specified experimentally under the laboratory and plant conditions. Conditioning of the slag adjustment by the lime consumption during the steel electrosmelting in an arc furnace is defined. Conclusions on the effect of the furnace thermal performance on the principle processes of the carbonate raw materials kilning in the industrial lime manufacturing are formulated. The optimal furnace temperature conditions for manufacturing quality lime with more than 90% *CaO* are specified.

Keywords: burning conditions, rotary kiln, industrial lime, quality, heat flux, criterial dependences, heat exchange, steel industry, electrosmelting, arc furnace, slagging.

Введение. Получение стали стандартно-высокого качества обеспечивается технологиями плавки соответствующего уровня [1]. Шлакообразование в сталеплавильных печах и при наведении шлака в ковшах во время внепечной обра-

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** e-mail: ansimow@yandex.ru, merker@inbox.ru, akem@dstu.edu.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

ботки жидкой стали аргоном или азотом требует использования промышленной извести [2]. При этом основные технико-экономические показатели производства стали [3] во многом зависят от технологических решений по оптимизации расхода извести в процессе наведения шлака, а также от качества промышленной извести, используемой в сталеплавильном производстве. Эти показатели во многом зависят от температурных условий обжига известняка во вращающейся печи. Таким образом, исследование указанных условий, установление оптимальных режимов представляется важной научно-технической задачей.

Целью работы является исследование влияния температурных условий режима обжига известняка во вращающейся печи на показатели качества промышленной извести, используемой в сталеплавильном производстве.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Исследования проводились на вращающихся печах обжига карбонатного сырья / известняка для получения промышленной извести, необходимой в металлургии. В частности, рассматривались производственные условия ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат» (ОЭМК) [4–5].

Действующая технология обжига во вращающейся печи предусматривает нагрев известняка до температур от 900 ºC до 1300 ºC. В этом случае происходит (с разной степенью интенсивности) термическая диссоциация исходного продукта по реакции: $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2\uparrow$. При этом для полного разложения карбоната кальция с получением 1 кг CaO теоретически требуется $100{,}09/56{,}08 = 1{,}786$ кг $CaCO_3$. Известно, что для разложения 1 кг $CaCO_3$ требуется 1780 кДж теплоты, следовательно, для получения 1 кг CaO потребуется $1780 \times 1{,}786 = 3185$ кДж теплоты.

Основные показатели работы печи (производительность по извести, расход сырья, удельный расход топлива) определяются условиями теплообмена и параметрами обжига — в частности, температурами обжига извести ($T_{о.м.}$, ºC), уходящих газов ($T_{ух.}$, ºC) и выгружаемой из печи извести ($T_{из.}$, ºC), а также скоростью и давлением/разряжением газов, химическим составом газов и известняка.

При заданной/постоянной производительности существует зависимость между качеством обожженного сырья и параметрами тепловой работы печи [6–8], в значительной мере определяемая развитием теплообмена в полуограниченном рабочем пространстве вращающейся печи.

Известно [9], что система уравнений, описывающих граничные условия процесса нагрева известняка лучистым тепловым потоком, значительно усложняется в случае параллельно действующего конвективного теплообмена. Для упрощения расчетов предложено совместный лучистый и конвективный теплообмен свести к конвективному (по форме), используя известные критериальные зависимости.

Для изучения влияния условий теплообмена на характер изменения температуры сыпучего материала (карбонатного сырья) в печи использовали следующие критериальные зависимости:

$$B_о = (q \times G) / (\sigma_о \times \varepsilon \times T_г^4 \times F);$$
$$C_к = (Re^{0,8} \times \lambda \times L \times T_г) / (q \times G); \qquad (1)$$
$$W = q / (c \times m_{ср} \times T_г),$$

где $B_о$ — критерий Больцмана; $C_к$ — энергетический критерий, учитывающий эффективность расхода газа в условиях конвективного теплообмена; $Re = \omega \times D/\upsilon$ (критерий Рейнольдса): ω — скорость газа в печи, м/с; D и L — диаметр и длина зоны горения в печи, м; υ — кинематическая вязкость газа, м/с^2, λ — коэффициент теплопроводности газа (1,630 Вт /(м·град. К); W — величина, характеризующая соотношение между падением температуры газа (после факела) и подъемом температуры материала ($T_м \rightarrow$ max) в условиях противотока газа в печи; q — удельный расход тепла, кДж/кг; G — производительность печи, кг/ч; $\sigma_о$ — коэффициент излучения абсолютно черного тела; ε — приведенная степень черноты; $T_г$ — теоретическая температура горения, К; F — поверхность теплообмена, м^2; c — средняя теплоемкость материала в печи (1,1 кДж/(кг × град. К); $m_{ср}$ — средний удельный расход сырья в печи, кг/кг.

Проведенными исследованиями между конечным содержанием (CaO, %) в извести и критериями $B_о$ и W достоверных взаимосвязей не установлено, несмотря на то, что конвективная составляющая ($C_к$) процесса оказывает меньшее влияние на зону обжига с максимальной излучательной способностью факела. В этой связи представляется целесообразным ввести в качестве дополнительного параметра критерий качества обожженной извести в виде: $K_{CaO} = T_{м(опт.)} / T_{эф}$. Данное выражение представляет отношение оптимальной температуры ($T_{м(опт.)}$,ºC) обжига материала (известняка) к усредненной (эффективной) температуре ($T_{эф}$, ºC) в зоне обжига печи. При этом $T_{м(опт.)} / T_{эф.} > 1$ наступает процесс пережога материала, а при $T_{м(опт.)} / T_{эф.} < 1$ имеет место недопал (недожог).

Из критериального выражения (1) для величины W находим: $q = W \times c \times m_{ср} \times T_г$. Подставив значение q в выражение для $B_о$ получим:

$$B_о = W [(c \times m_{ср} \times G) / (\sigma_о \times \varepsilon \times T_г^3 \times F)]. \qquad (2)$$

Из анализа выражения (2) следует, что при сужении зоны обжига в печи, повышении $m_{ср}$ и $T_г$, стремлении величины W к максимуму растет значение $B_о$, а это способствует увеличению параметров q и G работы печи, что согласуется с данными [6–8].

Обработка опытных данных по обжигу известняка во вращающейся печи позволила получить зависимость $T_{м(опт.)} / T_{эф.} = B_о \times W^{-1,73}$, учитывающую подогрев воздуха для горения топлива с заданным коэффициентом расхода, нагрев известняка отходящими газами в подогревателе и возврат пыли в печь.

Эффективную температуру ($T_{эф}$,°С) в зоне обжига печи находили по уравнению в виде:

$$T_{эф.} = [(\eta_{КПД} \times T^2_{кал.} + T^2_{м.})\,(T^2_{ух.} - T^2_{м.})]^{0,25}, \quad (3)$$

где $\eta_{КПД}$ — значение КПД печи; $T_{кал}$ — калориметрическая температура горения топлива, ^{0}С; $T_{ух}$ — температура уходящих из зоны обжига газов, ^{0}С; $T_м$ — температура материала (извести) на выходе из печи, ^{0}С.

Таким образом, представляется возможным определить температурный уровень $T_{м(опт.)}$ нагрева известняка в зоне обжига вращающейся печи. С помощью компьютерной программы *STINITUMISIS* проведен расчет $T_{эф}$ и K_{CaO} с учетом данных по критериям $B_о$, $C_к$, W. Кроме того, проанализированы результаты обжига сырья с оценкой эффективности теплообмена при работе вращающейся печи по теплотехнологическим показателям (q, G, $\eta_{к.п.д}$, $T_г$ и др.). Обработка данных функционирования вращающейся обжиговой печи в цехе обжига извести (ЦОИ) ОАО «ОЭМК» подтвердила влияние указанных факторов на эффективную температуру в рабочем пространстве агрегата при различных значениях коэффициента теплопередачи.

Приведенные на рис. 1 данные характеризуют взаимосвязь $T_{эф}$ с параметрами технологического процесса обжига карбонатного сырья при производстве извести во вращающейся печи, а именно зависимость $\tau_{дис.}$:

— от эффективной температуры ($T_{эф}$,^{0}С) в зоне обжига известняка при различных значениях коэффициентов теплопередачи k, Вт/(м^2·К);

— от потока газа теплоносителя (азот, скорость потока 0,055м/с) к поверхности материала.

Кроме того, представленные данные иллюстрируют характер зависимости $T_м/T_{эф.}$ = f ($B_о$; W), учитывающей соотношение падения температуры в конце факела газа и подъема температуры материала при противотоке в печи, вследствие протекания экзотермических реакций в потоке известняка.

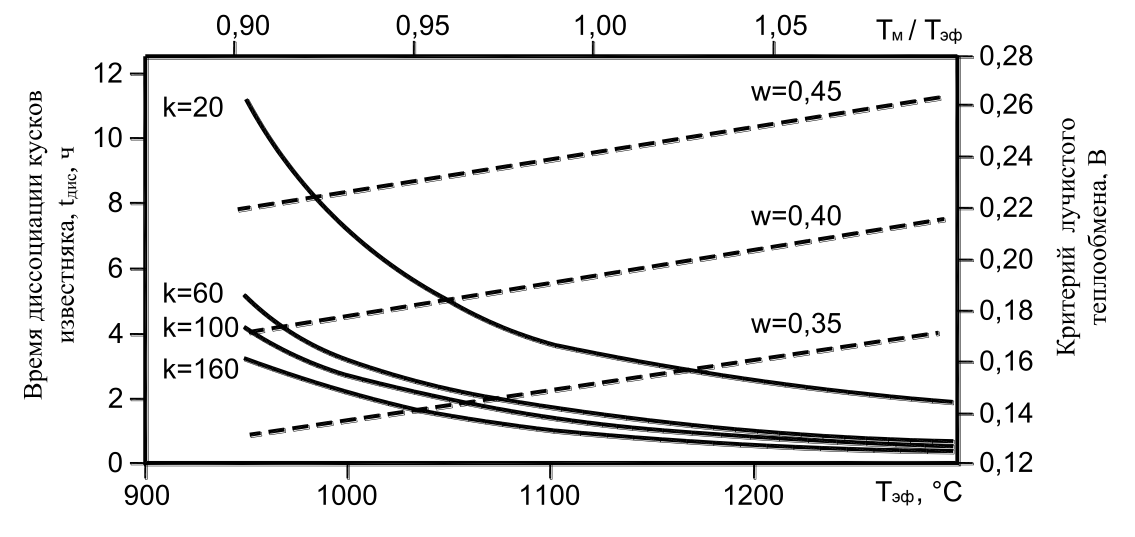


Рис. 1. Взаимосвязь параметров технологического процесса обжига карбонатного сырья

На основании полученных данных можно сделать следующий вывод. Для производства качественной извести [4, 5] режим обжига известняка во вращающейся печи должен обеспечивать:

— требуемую производительность агрегата;

— пониженный удельный расхода тепла;

— рациональный предел конечной температуры извести $T_{из.(в)}$,°С на выходе из печи при входе ее в холодильник агрегата [10].

Установлен характер влияния параметров температурного режима (рис. 2) в агрегате на свойства извести. При этом в качестве основы использован анализ данных:

— о работе вращающихся печей обжига известняка в ЦОИ ОАО «ОЭМК»;

— о проведенных лабораторных исследованиях.

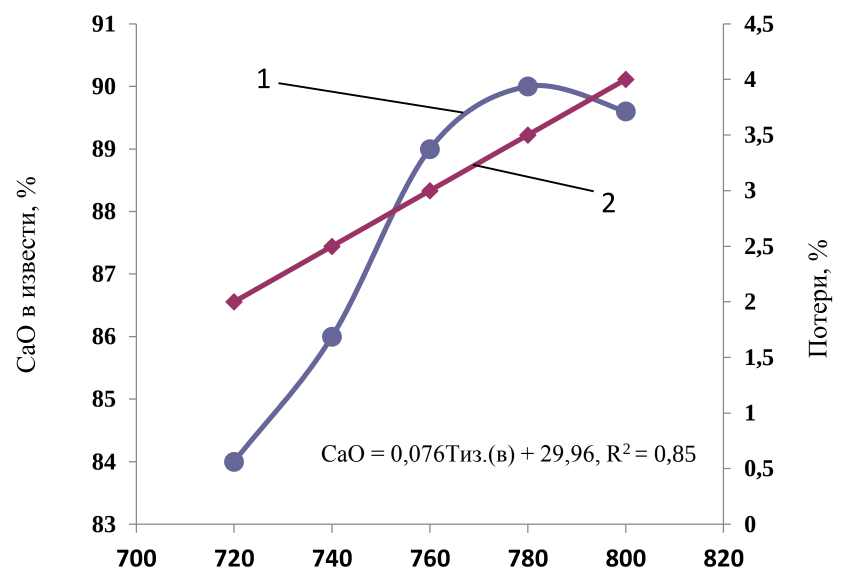


Рис. 2. Влияние температуры извести на содержание *CaO* (кривая 1) и потери при прокаливании (кривая 2)

Содержание *CaO* в извести достигает экстремума (более 90 %) (рис. 2, кривая 1) при температуре извести на выходе из вращающейся печи, $T_{\text{из.(в)}}$, равной примерно 780–800 ºC. Допустимые потери при прокаливании (ППП) в извести — около 4 % (рис. 2, кривая 2).

Проведенное исследование позволило установить (рис. 3, кривая 1) четкую зависимость, указывающую на достоверность взаимосвязи температуры извести на выходе из вращающейся печи $T_{\text{из(в)}}$ и температуры известняка в зоне обжига агрегата:

$$T_{\text{из-к(о)}} : T_{\text{из.(в)}} = 0{,}3945 T_{\text{из-к(о)}} + 322{,}17;\ R^2 = 0{,}61.$$

Это позволяет осуществлять контроль содержания *CaO* в извести.

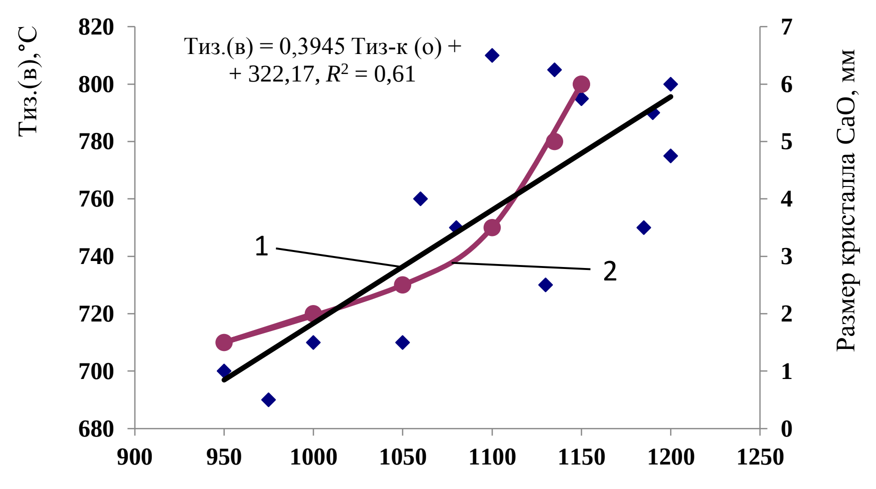


Рис. 3. Влияние температуры обжига на температуру извести на выходе из вращающейся печи (Тиз.(в) ºC) (кривая 1) и размер кристаллов *CaO*, (М, мм) (кривая 2)

Установлено также влияние температуры обжига известняка ($T_{из\text{-}к.(о)}$,ºС) на размеры кристаллов CaO (рис. 3, кривая 2) после обжига материала.

При определении оптимального расхода извести [2] в процессе электроплавки металлизованных окатышей в дуговой печи исходили из накапливающейся массы шлака ($G_{шл}$, кг) с учетом образующегося оксида железа (FeO) по формуле:

$$G_{шл.} = G_{шл.(0)} + (V_{ок.} \times В/100 + V_{(FeO)} + V_{изв.}) \times (\tau - \tau_0), \quad (4)$$

где $G_{шл.(0)}$ — количество шлака в печи в момент начала (τ_0, с) подачи окатышей в ванну, кг; $V_{ок}$ — расход окатышей, кг/с; В — содержание пустой породы в окатышах (CaO и SiO_2), %; $V_{(FeO)}$ — суммарная скорость образования (FeO) в шлаке, кг/с; $V_{изв.}$ — скорость подачи извести в печь, кг/с; τ_0 и τ — начальное и текущее время по ходу плавки, с.

По ходу плавки окатышей необходимо поддерживать оптимальный уровень основности шлака ($B = CaO/SiO_2$), подавая в печь соответствующее количество извести [3]. Для расчета из выражения (4) распишем массы CaO и SiO_2 в следующем виде:

$$CaO = (CaO)_0 + (V_{ок.} \times CaO_{ок.}/100 + V_{изв.}) \times (\tau - \tau_0), \quad (5)$$

$$SiO_2 = (SiO_2)_0 + (V_{ок.} \times (SiO_2)_{ок.}/100 + V_{изв.}) \times (\tau - \tau_0), \quad (6)$$

где $CaO_{ок.}$ и $(SiO_2)_{ок.}$ — содержание этих оксидов в окатышах, кг; $(CaO)_0$ и $(SiO_2)_0$ — начальная масса этих оксидов в шлаке перед подачей окатышей в печь, кг.

Одновременное решение выражений (5) и (6) позволяет получить величину оптимальной скорости подачи извести в дуговую печь по ходу электроплавки окатышей:

$$V_{изв.(опт)} = (B \times (SiO_2)_{ок} - CaO_{ок}) \times V_{ок}/100 + (B \times (SiO_2)_0 - (CaO)_0)/(\tau - \tau_0). \quad (7)$$

Таким образом, использование выражения (7) обеспечивает оптимальный расход извести, помещаемой в ванну дуговой печи. Это позволяет:

— экономить известь при электроплавке окатышей;

— воздействовать на интенсификацию процесса шлакообразования, ускорение процессов десульфурации и дефосфорации металла.

Таким образом, повышается производительность печи и улучшается качество стали.

Оптимизация же температурного режима обжига известняка во вращающейся печи влияет на содержание CaO в извести и, следовательно, на конечные показатели электроплавки стали.

Выводы:

1. Установлены закономерности влияния параметров тепловой работы печи на основные технологические процессы обжига карбонатного сырья при производстве промышленной извести. Показано, что система уравнений, описывающих граничные условия процесса нагрева известняка лучистым тепловым потоком, значительно усложняется в случае параллельно действующего конвективного теплообмена. Для упрощения расчетов предложено совместный лучистый и конвективный теплообмен свести к конвективному (по форме), используя известные критериальные зависимости.

2. Предложено критериальное уравнение зависимости показателей качества извести от критерия B_0 и числа W, позволяющее определять оптимальную температуру в зоне обжига печи в зависимости от условий производства. Определены оптимальные условия температурного режима печи для производства качественной извести с содержанием более 90 % CaO. Установлена четкая корреляция $T_{из.(в)} = 0{,}3945 T_{из\text{-}к(о)} + 322{,}17$; $R^2 = 0{,}61$. Она указывает на достоверность взаимосвязи температуры извести на выходе из вращающейся печи $T_{из.(в)}$, ºС и температуры известняка в зоне обжига агрегата $T_{из\text{-}к(о)}$, ºС. Изучены закономерности влияния показателей качества извести на интенсификацию процессов шлакообразования при электроплавке стали. Предложена методика, позволяющая оптимизировать присадки извести и улучшить в целом показатели процесса электроплавки стали.

Библиографический список

1. Сталь на рубеже столетий / под ред. Ю. С. Карабасова. — Москва : МИСиС, 2001. — С. 664.

2. Исследование роли извести при шлакообразовании и внепечной обработке стали инертными газами / Д. А. Бахаев [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2013. — № 7/8 (75). — С. 35–42.

3. Кем, А. Ю. К вопросу об оптимизации выплавки стали в дуговой печи и ее внепечной обработки в агрегате «ковш-печь» / А. Ю. Кем, В. О. Казарцев, Э. Э. Меркер, Д. А. Харламов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — Т. 14, № 2 (77). — С. 66–71.

4. Нехлебаев, Ю. П. Экономия топлива при производстве извести / Ю. П. Нехлебаев. — Москва : Металлургия, 1987. — 136 с.

5. Бергауз, А. Л. Повышение эффективности сгорания топлива в печах / А. Л. Бергауз, Э. И. Розенфельд. — Ленинград : Недра, 1984. — 175 с.

6. Меркер, Э. Э. Совершенствование методики контроля параметров режима сжигания топлива во вращающихся печах / Э. Э. Меркер, Д. А. Харламов, А.А. Ансимов // Черная металлургия. Бюлл. НТИ. — 2011. — № 7. — С. 78–81.

7. Антонов, Г. Л. Особенности эксплуатации коротких вращающихся печей обжига известняка / Г. Л. Антонов // Сталь. — 2008. — № 9. — С. 97–99.

8. Гамей, А. И. Освоение технологии обжига известняка во вращающихся печах / А. И. Гамей // Черная металлургия. Бюлл. НТИ. — 2002. — № 6. — С. 3–5.

9. Фокин, В. М. Основы энергосбережения в вопросах теплообмена / В. М. Фокин, Г. П. Бойков, Ю. В. Видин. — Москва : Машиностроение, 2005. — С. 143.

10. Меркер, Э. Э. Повышение эффективности сжигания топлива во вращающихся печах обжига извести / Э. Э. Меркер, Т. В. Агаркова, В. В. Губин // Черная металлургия. Бюлл. НТИ. — 1995. — № 5. — С. 28–30.

References

1. Karabasov, Y. S., ed. Stal' na rubezhe stoletiy. [Steel at the turn of the century.] Moscow: MISSiS, 2001, 664 p. (in Russian).

2. Bakhayev, D. A., Kochetov, A. I., Kem, A. Y., Ansimov, A. A Issledovanie roli izvesti pri shlakoobrazovanii i vnepechnoy obrabotke stali inertnymi gazami. [Investigation of the role of lime under slagging and inert-gas secondary steel refining.] Vestnik of DSTU, 2013, no. 7/8(75), pp. 35-42 (in Russian).

3. Kem, A. Y., Kazartsev, V. O., Merker, E. E., Kharlamov, D. A. K voprosu ob optimizatsii vyplavki stali v dugovoy pechi i ee vnepechnoy obrabotki v agregate «kovsh-pech'». [Optimization of steelmaking in electric arc furnace and ladle treatment in the ladle-furnace] Vestnik of DSTU, 2014, vol. 14, no. 2(77), pp.66-71 (in Russian).

4. Nekhlebayev, Y. P. Ekonomiya topliva pri proizvodstve izvesti. [Fuel saving in lime manufacturing.] Moscow: Metallurgiya, 1987, 136 p. (in Russian).

5. Berghaus, A. L., Rosenfeld, E. I. Povyshenie effektivnosti sgoraniya topliva v pechakh. [Improving the furnace fuel efficiency.] Leningrad: Nedra, 1984, 175 p. (in Russian).

6. Merker, E. E., Kharlamov, D. A., Ansimov, A. A. Sovershenstvovanie metodiki kontrolya parametrov rezhima szhiganiya topliva vo vrashchayushchikhsya pechakh. [Improving the parameter checking technique of fuel combustion conditions in rotary kilns.] Chernaya metallurgiya. NTI Bull., 2011, no. 7, pp. 78-81 (in Russian).

7. Antonov, G. L. Osobennosti ekspluatatsii korotkikh vrashchayushchikhsya pechey obzhiga izvestnyaka. [Special operation features of short rotary lime-burning kilns.] Steel, 2008, no. 9, pp. 97-99 (in Russian).

8. Gamey, A. I. Освоение технологии обжига известняка во вращающихся печах. [Development of limestone burning technology in rotary kilns.] Chernaya metallurgiya. NTI Bull., 2002, no.6, pp. 3-5 (in Russian).

9. Fokin, V. M., Boykov, G. P., Vidin, Y. V. Osnovy energosberezheniya v voprosakh teploobmena. [Fundamentals of heat energy saving issues.] Moscow: Mashinostroenie, 2005, 143 p. (in Russian).

10. Merker, E. E, Agarkova, T. V., Gubin, V. V. Povyshenie effektivnosti szhiganiya topliva vo vrashchayushchikhsya pechakh obzhiga izvesti. [Improving the furnace fuel efficiency in rotary lime-burning kilns.] Chernaya metallurgiya. NTI Bull., 2005, no. 5, pp. 28-30 (in Russian).

Поступила в редакцию 08.09.2014
Сдана в редакцию 09.09.2014
Запланирована в номер 28.01.2015

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.893 DOI 10.12737/10391

Изучение влияния ферромагнитных наночастиц на триботехнические характеристики смазок*

Е. Г. Задошенко[1], В. Э. Бурлакова[2]**
[1,2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Study of ferromagnetic nanoparticles effect on tribotechnical lubricating characteristics***

E. G. Zadoshenko[1], V. E. Burlakova[2]**
[1,2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Для уточнения состава синтезированных ферромагнитных частиц проводили качественный рентгенофазовый анализ методом дифрактометрии на автоматизированном приборе *ARL X΄TRA*. Для определения размеров частиц изучена водная суспензия ферромагнитных наночастиц на дисковой центрифуге *CPS Disk Centrifuge Model DC*24000. Исследования проводились методом определения трибологических характеристик с использованием четырехшариковой машины трения. На основе данных рентгенограмм в работе установлен состав ферромагнитных частиц, соответствующий магнетиту $FeFe_2O_4$. Обработка результатов седиментационного анализа показала полидисперсный характер полученных наночастиц магнетита. На основе трибологических исследований проведена оценка противоизносных свойств по величине диаметра пятна износа, расчет величин индекса задира, установлена несущая способность смазки по нагрузке сваривания и критической нагрузке для исследуемых смазок. Таким образом установлено, что смазочные композиции с добавками магнетита на основе пластической смазки «ЦИАТИМ-201» и масла *Castrol* с содержанием магнетита 0,1 % мас. обладают высокими противозадирными и противоизносными свойствами. Увеличение содержания магнетита в смазках приводит к снижению их противоизносных свойств.

Ключевые слова: магнитные наночастицы, химическая конденсация, магнетит, смазка, трение, износ, противоизносные и противозадирные свойства.

The research objective is to study tribological properties of the lubricating compositions based on the *Castrol* oil and *ZIATIM -201* plastic lubricant modified by the ferromagnetic nanosuspension. A qualitative X-ray phase analysis by the diffractometry method is conducted on the *ARL X΄TRA* computerized system to specify the compound of the synthesized ferromagnetic nanoparticles. An aqueous suspension of ferromagnetic nanoparticles is studied on *CPS Disk Centrifuge Model DC24000* to determine the particle sizes. The investigation has been conducted by determining the tribological characteristics using four-ball machine. The preparation of lubricating compositions based on a number of sequence operations – ferromagnetic particles synthesis, their stabilization, and paste concentrate preparation – is described. On the basis of the X-ray data, it is found that the ferromagnetic particles composition corresponds to $FeFe_2O_4$ magnetite. The sedimentation analytical data processing has shown the polydisperse nature of the derived magnetite nanoparticles. Based on the tribological studies, the antiwear properties are evaluated in wear scar diameter, the load wear index value is calculated, and the bearing capacity of the lubricant according to the welding load and critical load for the lubricants under study is identified. Thus, it is found that the lubricant compositions with magnetite additives based on *ZIATIM -201* plastic lubricant and *Castrol* oil with magnetite content of 0.1% wt. offer high antiwelding and antiwear properties. Increase in the magnetite content in lubricants leads to the degradation of their antiwear properties.

Keywords: ferromagnetic nanoparticles, chemical condensation, magnetite, lubricant, friction, wear, antiwear and antiwelding properties.

Введение. В настоящее время создание новых магнитных наноматериалов [1–3] представляет собой активно развивающееся направление современной науки и техники. Изучение свойств магнитных наноматериалов позволяет установить их зависимость от химического состава, типа кристаллической решетки, степени ее дефектности, размера и формы частиц, морфологии, взаимодействия частиц с окружающей их матрицей и соседними частицами. Изменяя размеры, форму, состав и строение наночастиц, можно в определенных пределах управлять магнитными характери-

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** e-mail: zadoshenkoq@rambler.ru, vburlakova@donstu.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

стиками материалов на их основе. Однако контролировать их при синтезе наночастиц удается не всегда, поэтому свойства однотипных наноматериалов могут сильно различаться [4]. Разнообразие физико-химических характеристик магнитных материалов предполагает их широкое применение в науке и технике. В первую очередь следует отметить ферромагнитные наносуспензии или магнитные жидкости [5].

В технических устройствах, в том числе подшипниковых узлах [6] магнитные жидкости используются как герметизирующие материалы для вращающих валов и аппаратов, работающих в условиях агрессивных сред, в демпфирующих устройствах и датчиках угла наклона в радиотехнике [7]. Разработанные технологические среды, смазочно-охлаждающие материалы, теплоносители на основе магнитных жидкостей и углеводородов, кремнийорганических соединений и воды дают положительный результат их применения для механической обработки металлов [8–10]. Появляются новые перспективные способы использования ферромагнитных материалов в качестве добавки к маслам и смазкам. Однако потенциальные возможности применения ферромагнитных наночастиц в технике весьма значительны и недостаточно используются. Этим обусловлена актуальность их исследований. Поэтому представляет интерес конструирование смазочных материалов с добавками ферромагнитных наночастиц, изучение особенностей их взаимодействия с поверхностью трибоконтакта и влияние на триботехнические характеристики смазок.

В связи с этим целью настоящей работы является изучение триботехнических характеристик смазочных композиций на основе «ЦИАТИМ-201» и масла *Castrol* с добавкой ферромагнитной наносуспензии.

Экспериментальная часть. Для синтеза ферромагнитных наночастиц использовали смесь солей хлорида железа (II) и хлорида железа (III) (степень чистоты — «х. ч.» в соотношении 1 : 2. К ней добавляли 1,5-кратный избыток 25 % водного раствора аммиака (степень чистоты — «ч. д. а»). Полученную суспензию черного цвета выдерживали в течение 30 минут на постоянном магните, затем отделяли образовавшиеся магнитные частицы от водного раствора солей. Полученный осадок промывали дистиллированной водой методом декантации. Операцию повторяли, пока значение *pH* раствора не достигало 6,5. Чистоту осадка контролировали на наличие ионов хлора проведением качественной реакции с нитратом серебра. Для стабилизации синтезированных ферромагнитных наночастиц использовали х. ч. олеиновую кислоту. Для полного отделения ферромагнитных наночастиц от водного раствора солей в смесь добавляли х. ч. гексан, нагревали на водяной бане. В результате проделанных операций получали пасту-концентрат.

В пластическую смазку «ЦИАТИМ-201» и моторное масло *Castrol* (*ATF Dex Multivehicle*) вводили 0,1 и 5 % мас. ферромагнитных частиц. Для этого на аналитических весах взвешивали соответственно 0,1; 5,0 г ферромагнитной суспензии, а также 99,9; 95,0 г «ЦИАТИМ-201» и моторного масла соответственно. Ферромагнитные частицы перемешивали в фарфоровой ступке со смазкой «ЦИАТИМ-201» до однородного состояния в течение 30 минут. Смазка должна быть однородной, без комков и выделяющегося масла. Однородность смазочной композиции определяли визуально. Для этого смазку наносили шпателем на предметное стекло тонким слоем и оценивали при проходящем свете ее цвет и однородность. Для приготовления смазочной композиции моторное масло перемешивалось на магнитной мешалке с ферромагнитными наночастицами в течение 30 минут при температуре 40 ºС до однородного состояния.

Качественный рентгенофазовый анализ (РФА) проводили методом дифрактометрии на автоматизированном приборе *ARL X´TRA* при излучении *Cu* K_α линий анода с длиной волны 1,54056 Å с *Ni*-фильтром в отраженном пучке. Экспозицию проводили в интервале 2θ от 5^0 до 70^0 при скорости сканирования 5^0/мин и температуре 25 ^{0}С.

Для определения размеров частиц проводили анализ водной суспензии ферромагнитных наночастиц на дисковой центрифуге *CPS Disk Centrifuge Model DC*24000 производства фирмы *CPS* США. Образец водной дисперсии получали обработкой в ультразвуковом поле в течение 30 минут синтезированных ферромагнитных частиц в дистиллированной воде.

Трибологические исследования проводили по ГОСТ 9490-75. В качестве трущихся поверхностей использовали четыре стальных шарика диаметром 10 мм из стали ШХ-15. Верхний шарик закрепляли во вращающемся шпинделе (частота вращения равна 1460 ± 70 мин $^{-1}$), а три нижних неподвижно располагали в обойме машины с испытуемым смазочным материалом. Диаметр пятна износа $D_И$ определяли на основе 60-минутных испытаний при постоянной нагрузке 196 Н (20 кгс). Для определения критической нагрузки $P_к$, индекса задира $И_з$ и нагрузки сваривания $P_с$ проводили 10-секундные испытания серии нагрузок [11].

Обсуждение и результаты. Получение смазок включает в себя несколько операций.

1. Предложенный В.-С. Элмором [12, 13] синтез высокодисперсного магнетита Fe_3O_4 по методу химической конденсации (ХК) по реакции:

$$2FeCl_3 + FeCl_2 + 8NH_4OH = Fe_3O_4 + 8NH_4Cl + 4H_2O.$$

2. Пептизация осадка и промывка водой от растворимых солей для предотвращения коагуляции частиц магнетита и обеспечения хорошей адсорбционной способности с молекулами стабилизатора.

3. Стабилизация ферромагнитных частиц. Условием эффективной стабилизации частиц является совместимость феррофазы, стабилизатора и дисперсионной среды [14]. При этом наилучшими стабилизаторами оказываются вещества, хорошо растворяющиеся в дисперсионной среде. Их стабилизирующее действие объясняется понижением поверхностной энергии диспергированных частиц и увеличением абсолютной величины их электрокинетического потенциала, а также структурно-механических и стерических факторов. Выбор стабилизатора зависит от свойств несущей жидкости. Для магнитной жидкости на основе углеводородов в качестве стабилизатора используют поверхностно-активные вещества (ПАВ) — например, олеиновую кислоту или ее соли [15]. В настоящей работе стабилизацию ферромагнитных частиц осуществляли добавлением стабилизирующей смеси из расчета: магнетит (60–65 % мас.) — ПАВ (олеиновая кислота, 10–15 % мас.) — основа (гексан, 15–20 % мас.).

4. Получение пасты-концентрата и на ее основе создание смазочных композиций. Для уточнения состава синтезированных ферромагнитных частиц проводили качественный рентгенофазовый анализ (РФА) (рис. 1). Его результаты свидетельствуют о том, что синтезированные ферромагнитные частицы имеют состав Fe_3O_4 — магнетит класса обращенных шпинелей с кристаллической решеткой шпинели благородной $MgAl_2O_4$ [16] и общей формулой $MeFe_2O_4$.

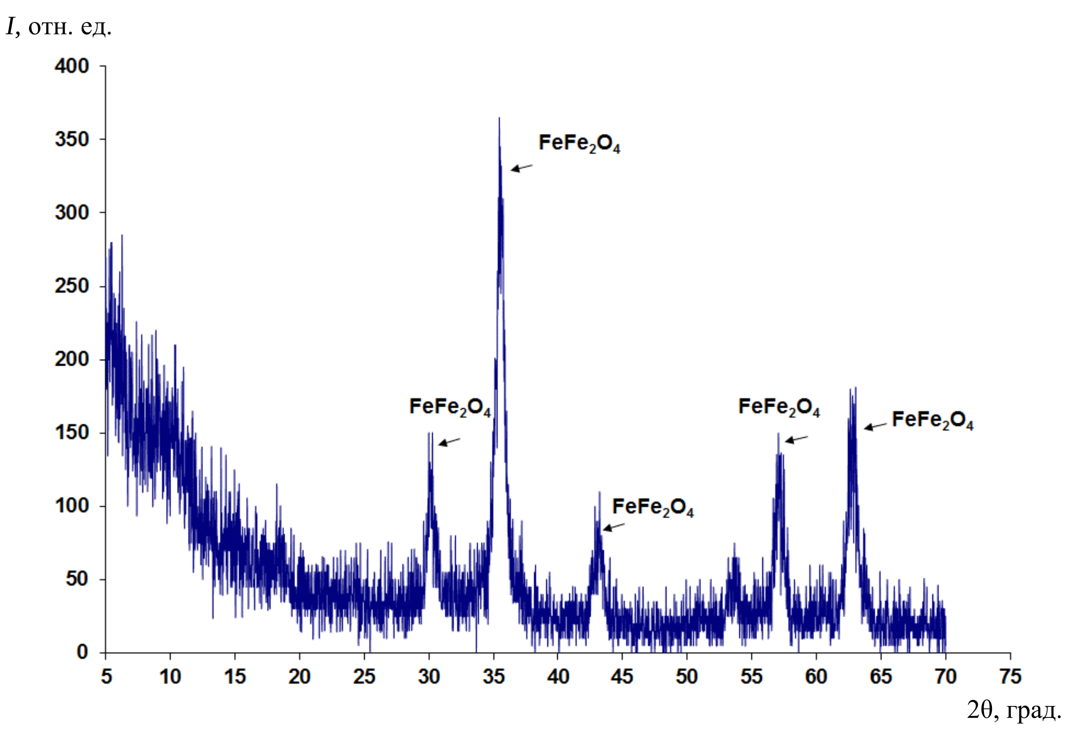


Рис. 1. Рентгенограмма ферромагнитных наночастиц

Размер ультрадисперсных ферромагнитных частиц определяли методом седиментационного анализа. Его результаты свидетельствуют о том, что 95 % частиц находится в диапазоне от 50 до 100 нм, с максимумом в 64 нм — 25 %. Таким образом, анализируемая дисперсия наночастиц магнетита имеет полидисперсный характер, а первичными кластерами магнетита являются кластеры с размером до 64 нм (рис. 2).

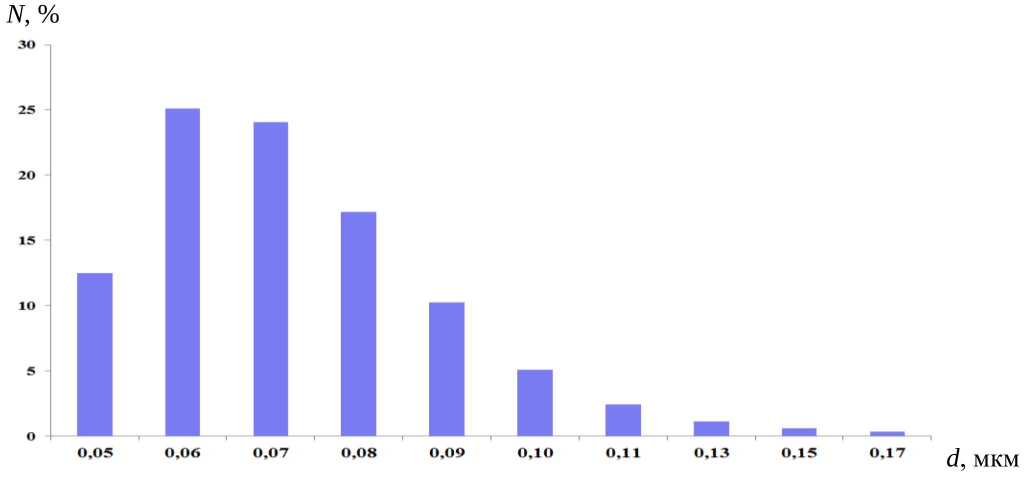


Рис. 2. Гистограмма распределения частиц магнетита по размерам

Триботехнические свойства сконструированных смазочных материалов (табл. 1) исследовали с использованием четырехшариковой машины трения ЧШМ-1.

Таблица 1

Состав исследуемых смазок

№ смазки	Состав
1	ЦИАТИМ-201
2	ЦИАТИМ-201 + 0,1 % наночастиц магнетита
3	ЦИАТИМ-201 + 5 % наночастиц магнетита
4	Масло *Castrol*
5	Масло *Castrol* + 0,1 % наночастиц магнетита
6	Масло *Castrol* + 5 % наночастиц магнетита

Противоизносные свойства смазок оценивали по величине диаметра пятна износа $D_и$ (рис. 3).

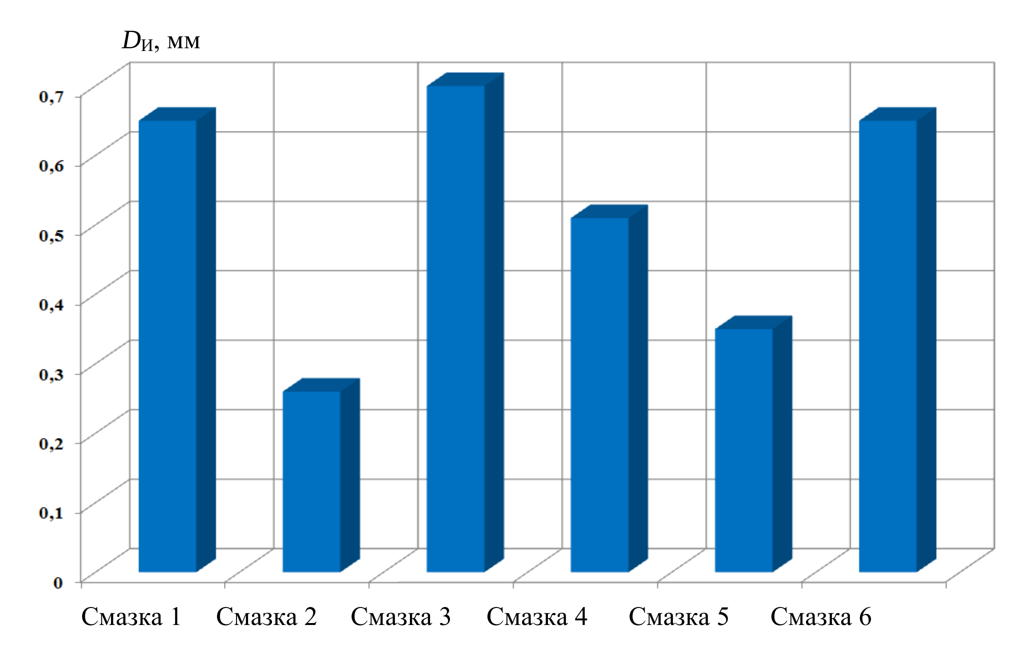


Рис. 3. Диаметр пятна износа для исследуемых смазок

Из гистограммы (рис. 3) следует, что значение $D_и$ для смазочной композиции с содержанием магнетита 0,1 % значительно ниже, чем для «ЦИАТИМ-201», однако при увеличении содержания магнетита наблюдается увеличение диаметра пятна износа. Аналогичные результаты обнаружены для масла *Castrol* с добавкой магнетита (рис. 3). С увеличением содержания магнетита в пластической смазке и масле диаметр пятна износа увеличивается, что связано, по-видимому, с появлением абразивного износа [17]. В соответствии с полученными результатами более эффективной является смазочная композиция с содержанием магнетита 0,1 % как для пластической смазки «ЦИАТИМ-201», так и для масла *Castrol*.

Для определения качества смазывающего действия смазочных композиций (табл. 1) проводили 10-секундные испытания по определению противозадирных свойств смазок (индекс задира $И_з$), способности смазки предотвращать возникновение задира трущихся поверхностей (критическая нагрузка $P_к$) и предельной работоспособности смазки (нагрузка сваривания $P_с$).

Значения критической нагрузки, при которой начинается разрушение смазочной пленки, и условия трения и износа при использовании различных смазок представлены на рис. 4. Смазочная композиция с добавлением 1 % частиц магнетита демонстрирует худшие показатели, чем чистая пластическая смазка и состав с 5-процентной добавкой

магнетита. При высоком содержании магнетита в масле *Castrol* значение критической нагрузки возрастает, при малом ее содержании — не изменяется.

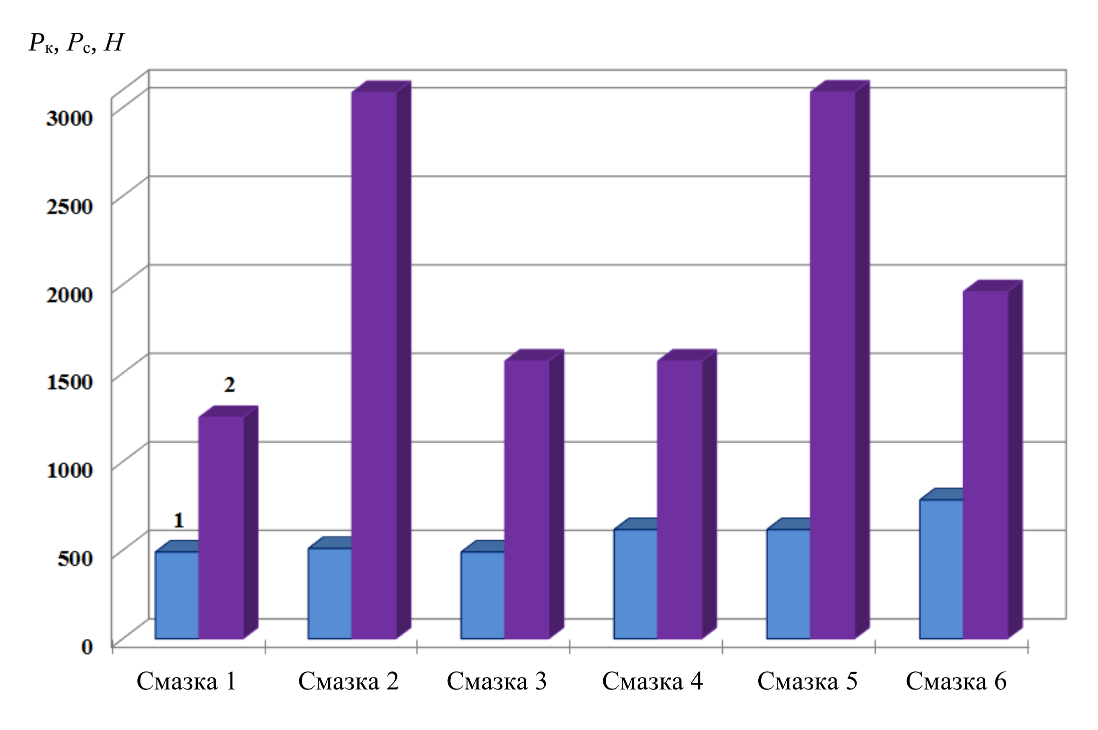


Рис. 4. Гистограмма значений критической нагрузки (1) и нагрузки сваривания (2) для исследуемых смазок

Результаты трибологических исследований свидетельствуют о том, что добавка магнетита приводит к увеличению индекса задира (рис. 5) для смазочных композиций как на основе пластической смазки «ЦИАТИМ-201», так и масла *Castrol*. Однако с ростом содержания магнетита наблюдается тенденция к снижению значений $И_з$. Таким образом, обнаружена область оптимального содержания добавки магнетита, при которой возможно предотвращение возникновения задира трущихся поверхностей. Для смазочных композиций с добавкой магнетита нагрузка сваривания, характеризующая полный разрыв смазки и потерю ее несущей способности, выше, чем для чистых смазок (рис. 4). Однако увеличение содержания магнетита приводит к снижению несущей способности смазочного материала.

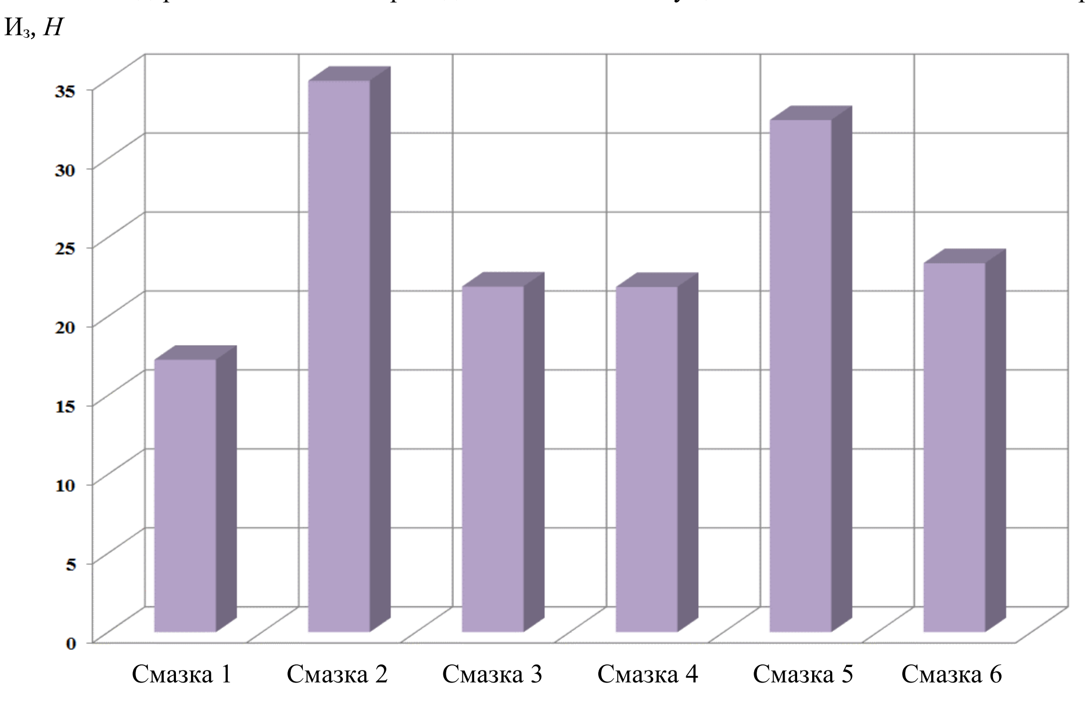


Рис. 5. Гистограмма значений индекса задира для исследуемых смазок

Таким образом, содержание магнетита в количестве 0,1 % мас. в составе смазки «ЦИАТИМ-201» и масла *Castrol* приводит к улучшению триботехнических показателей смазочных композиций. Это может быть связано с образованием частицами магнетита и ПАВ определенной структуры [18], характеризующейся низким сопротивлением сдвигу и уменьшением интенсивности изнашивания поверхностей в местах их соприкосновения [19]. С увеличением же содержания магнетита происходит его коагуляция в процессе трения, что вызывает абразивный износ и снижение триботехнических характеристик изученных смазочных композиций.

Выводы: Методом химической конденсации синтезированы ферромагнитные наночастицы, стабилизированные олеиновой кислотой. Фазовый состав магнетита класса обращенных ферритов-шпинелей $FeFe_2O_4$, средний размер — 64 нм. Обнаружено, что смазочные композиции с добавками магнетита на основе пластической смазки «ЦИАТИМ-201» и масла *Castrol* с содержанием магнетита 0,1 % мас. обладают высокими противозадирными и противоизносными свойствами. Увеличение содержания магнетита в смазках приводит к снижению их противоизносных свойств.

Библиографический список

1. Lu, A.-H. Magnetic nanoparticles: synthesis, protection, functionalization and application / A.-H. Lu, E.-L. Salabas, F. Schuth // Angewandte Chemie International Edition. — 2007. — Vol. 46, iss. 8. — P. 1222–1244.

2. Nickel nanoparticles obtained by a modified polyol process: synthesis, characterization, and magnetic properties / G.-G. Couto [et al.] // Journal of Colloid and Interface Science. — 2007. — Vol. 311, iss. 2. — P. 461–468.

3. Gherca, D. Synthesis, characterization and magnetic properties of MFe_2O_4 ($M = Co, Mg, Mn, Ni$) nanoparticles using ricin oil as capping agent / D. Gherca // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2012. — Vol. 324, iss. 24. — P. 3906–3911.

4. Баранов, Д. А. Магнитные наночастицы: достижения и проблемы химического синтеза / Д. А. Баранов, С. П. Губин // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. — 2009. — Т. 1, № 1/2. — С. 129–147.

5. Pileni, M.-P. Magnetic fluids: fabrication, magnetic properties and organization of nanocrystals / M.-P. Pileni // Advanced Functional Materials. — 2001. — Vol. 11, № 5. — P. 323–336.

6. Подгорков, В. В. Повышение долговечности, надежности и трибологической безопасности технических устройств путем применения магнитных жидкостей / В. В. Подгорков // Вестник Ивановского гос. энергетич. ун-та. — 2005. — Вып. 3. — С. 70–74.

7. Магнитные жидкости в машиностроении / под общ. ред. Д. В. Орлова, В. В. Подгоркова. — Москва : Машиностроение, 1993. — 272 с.

8. Лапочкин, А. И. Использование магнитных жидкостей в качестве смазки в мелкомодульных зубчатых передачах / А. И. Лапочкин // Вестник машиностроения. — 2002. — № 6. — С. 34–36.

9. Методология создания смазочных материалов с наномодификаторами / М. Люты [и др.] // Трение и износ. — 2002. — Т. 23, № 4. — С. 411–424.

10. Перекрестов, А. П. Механизм действия противоизносной присадки на магнитной основе / А. П. Перекрестов, В. А. Непомнящий // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. — 2008. — № 2 (43). — С. 46–50.

11. Материалы смазочные жидкие и пластичные. Метод определения трибологических характеристик на четырехшариковой машине : ГОСТ 9490-75 / Министерство нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности СССР ; Государственный комитет стандартов Совета министров СССР. — Москва : Издательство стандартов, 1987. — 8 с.

12. Elmore, W.-C. Ferromagnetic Colloid for Studying Magnetic Structures / W.-C. Elmore // Physical Review. — 1938. — Vol. 54, № 5. — № 309–310.

13. Synthesis of magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles without surfactants at room temperature / I. Martinez-Mera [et al.] // Materials Letters. — 2007. — Vol. 61, iss. 23–24. — P. 4447–4451.

14. Губин, С. П. Что такое наночастица? Тенденции развития нанохимии и нанотехнологии / С. П. Губин // Российский химический журнал (Журнал Рос. хим. общ-ва им. Д. И. Менделеева). — 2000. — Т. 44, № 6. — С. 23–31.

15. Preparation and properties of an Aqueous Ferrofluid / P. Berger [et al.] // Journal of Chemical Education. — 1999. — Vol. 76, № 7. — P. 943–948.

16. Комлев, А. А. Формирование наночастиц железо-магниевой шпинели при дегидрации соосажденных гидроксидов магния и железа / А. А. Комлев, С. Илхан // Наносистемы: физика, химия, математика. — 2012. — Т. 3, № 4. — С. 114–121.

17. Вернигоров, Ю. М. Разрушение частиц ферромагнитного материала в магнитовибрирующем слое с высокой порозностью / Ю. М. Вернигоров, Н. Н. Фролова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11, № 7 (58). — С. 1127–1131.

18. Квантовохимическое исследование взаимодействия спиртов с ювенильной поверхностью меди / А. С. Кужаров [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2004. — Т. 4, № 4 (22). — С. 485–488.

19. Мельников, А. Ф. Эффективность применения присадок на основе частиц твердых материалов при приработке деталей двигателей внутреннего сгорания / А. Ф. Мельников // Известия Самарского науч. центра Рос. академии наук. — 2011. — Т. 13, № 4 (3). — С. 1116–1118.

References

1. Lu, A.-H., Salabas, E.-L., Schuth, F. Magnetic nanoparticles: synthesis, protection, functionalization and application. Angewandte Chemie International Edition, 2007, vol. 46, iss. 8, pp. 1222–1244.

2. Couto, G.-G., et al. Nickel nanoparticles obtained by a modified polyol process: synthesis, characterization, and magnetic properties. Journal of Colloid and Interface Science, 2007, vol. 311, iss. 2, pp. 461–468.

3. Gherca, D. Synthesis, characterization and magnetic properties of MFe_2O_4 (M = Co, Mg, Mn, Ni) nanoparticles using ricin oil as capping agent. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2012, vol. 324, iss. 24, pp. 3906–3911.

4. Baranov, D. A., Gubin, S. P. Magnitnye nanochastitsy: dostizheniya i problemy khimicheskogo sinteza. [Magnetic nanoparticles: achievements and problems of chemical synthesis.] Radioelektronika. Nanosistemy. Informatsionnye tekhnologii. 2009, vol. 1, no. ½, pp. 129–147 (in Russian).

5. Pileni, M.-P. Magnetic fluids: fabrication, magnetic properties and organization of nanocrystals. Advanced Functional Materials, 2001, vol. 11, no. 5, pp. 323–336.

6. Podgorkov, V. V. Povyshenie dolgovechnosti, nadezhnosti i tribologicheskoy bezopasnosti tekhnicheskikh ustroystv putem primeneniya magnitnykh zhidkostey. [Increasing the durability, reliability, and tribological safety of technological devices by applying magnetic fluids.] Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University, 2005, iss. 3, pp. 70–74 (in Russian).

7. Orlov, D. V., Podgorkov, V. V., eds. Magnitnye zhidkosti v mashinostroenii. [Magnetic fluids in industry.] Moscow: Mashinostroenie, 1993, 272 p. (in Russian).

8. Lapochkin, A. I. Ispol'zovanie magnitnykh zhidkostey v kachestve smazki v melkomodul'nykh zubchatykh peredachakh. [Application of ferrofluid lubricants in the finegrained gear drives.] Vestnik mashinostroeniya, 2002, no. 6, pp. 34–36 (in Russian).

9. Luty, M., et al. Metodologiya sozdaniya smazochnykh materialov s nanomodifikatorami. [Methods of creating lubricating materials with nanomodifiers.] Friction and Wear, 2002, vol. 23, no. 4, pp. 411–424 (in Russian).

10. Perekrestov, A. P., Nepomnyashchiy, V. A. Mekhanizm deystviya protivoiznosnoy prisadki na magnitnoy osnove. [Mechanism of antiwear magnetic additive.] Vestnik of Astrakhan State Technical University, 2008, no. 2 (43), pp. 46–50 (in Russian).

11. Materialy smazochnye zhidkie i plastichnye. Metod opredeleniya tribologicheskikh kharakteristik na chetyrekhsharikovoy mashine: GOST 9490-75. [GOST 9490-75. Liquid lubricating and plastic materials. Method of test for lubricating properties on four ball machine.] Ministry of Oil Refining and Petrochemical Industry of the USSR; State Committee for Standards of Council of Ministers of the USSR. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1987, 8 p. (in Russian).

12. Elmore, W.-C. Ferromagnetic Colloid for Studying Magnetic Structures. Physical Review, 1938, vol. 54, no. 5, pp. 309–310.

13. Martinez-Mera, I., et al. Synthesis of magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles without surfactants at room temperature. Materials Letters, 2007, vol. 61, iss. 23–24, pp. 4447–4451.

14. Gubin, S. P. Chto takoe nanochastitsa? Tendentsii razvitiya nanokhimii i nanotekhnologii. [What is a nanoparticle? Trends in the development of nanochemistry and nanotechnology.] Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal (Journal of Mendeleev Russian Chemical Society), 2000, vol. 44, no. 6, pp. 23–31 (in Russian).

15. Berger, P., et al. Preparation and properties of an Aqueous Ferrofluid. Journal of Chemical Education, 1999, vol. 76, no. 7, pp. 943–948.

16. Komlev, A. A., Ilhan, S. Formirovanie nanochastits zhelezo-magnievoy shpineli pri degidratsii soosazhdennykh gidroksidov magniya i zheleza [Formation of iron-magnesium spinel nanoparticles under dehydration of coprecipitated hydroxides of magnesium and iron.] Nanosystems: physics, chemistry, mathematics, 2012, vol. 3, no. 4, pp. 114–121 (in Russian).

17. Vernigorov, Y. M., Frolova, N. N. Razrushenie chastits ferromagnitnogo materiala v magnitovibriruyushchem sloe s vysokoy poroznost'yu. [Destruction of ferromagnetic material particles in magnetovibrating layer with high porosity.] Vestnik of DSTU, 2011, vol. 11, no. 7 (58), pp. 1127–1131 (in Russian).

18. Kuzharov, A. S., et al. Kvantovokhimicheskoe issledovanie vzaimodeystviya spirtov s yuvenil'noy poverkhnost'yu medi. [Quantum-chemical study on the interaction of alcohols with juvenile copper surface.] Vestnik of DSTU, 2004, vol. 4, no. 4 (22), pp. 485–488 (in Russian).

19. Melnikov, A. F. Эффективность применения присадок на основе частиц твердых материалов при приработке деталей двигателей внутреннего сгорания [Efficiency of using additives based on solid material particles during break-in period of the ICE parts.] Izvestiya Samarskogo nauch. tsentra Ros. akademii nauk, 2011, vol. 13, № 4 (3), pp. 1116–1118 (in Russian).

Поступила в редакцию 19.11.2014
Сдана в редакцию 19.11.2014
Запланирована в номер 28.01.2015

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 629.733.5 DOI 10.12737/10392

Методическое обеспечение проектирования воздушно-газовой системы дирижаблей нового поколения*

А. Н. Кирилин[1], А. А. Болдырева[2] **
[1,2] Закрытое акционерное общество «Аэростатика», Москва, Российская Федерация

Methodological design support for new-generation airship gas-air system***

A. N. Kirilin[1], A. A. Boldyreva[2]**
[1,2] ZAO «Aerostatika», Moscow, Russian Federation

Целями настоящей работы являются: методическое обеспечение проектирования ВГС дирижаблей нового поколения; разработка практических рекомендаций по выбору геометрических и физических параметров основных элементов ВГС. В работе проанализированы функциональные возможности воздушно – газовой системы дирижаблей нового поколения. Разработана методика проектирования основных параметров ВГС многоцелевых, транспортных и высотных (в том числе стратосферных) дирижаблей применительно к адиабатическому процессу теплообмена несущего газа и воздуха в корпусе летательного аппарата с окружающей средой. Алгоритм, соответствующий предлагаемой методике проектирования, реализован и внедрен в блок «Аэростатика» модернизированного программного комплекса формирования облика дирижаблей различных типов, написанном на языке объектно-ориентированного программирования С++. Проведено исследование основных параметров ВГС дирижаблей в зависимости от их объема, высоты полета, скороподъемности и типа газа (воздух, гелий, флегматизированный водород). Представленные табличные и графические интерпретации расчетных параметров ВГС дирижаблей различного назначения в широком диапазоне их размерностей позволили обозначить практические рекомендации по выбору геометрических и физических параметров основных элементов ВГС дирижаблей и могут быть использованы авиационными специалистами при разработке перспективных образцов воздухоплавательной техники.

The research subject is a design process of gas-air system (GAS) of multi-purpose, transport, and high-altitude (including stratospheric) airships. This research objectives are a methodological design support of the new-generation airship GAS; the development of practical recommendations for selecting geometrical and physical parameters of the basic GAS elements. The functionality of the new-type airship GAS is analyzed. The design technique of the multi-purpose, transport, and high-altitude (including stratospheric) airship basic GAS parameters as applied to the adiabatic process of heat exchange of the buoyant gas and air in the airframe with the environment is developed. The algorithm corresponding to the offered technique has been implemented and introduced in the «Aerostatics» block of the updated conceptual software for various types of airships. The algorithm is written in the object-oriented C++ programming. The basic airship GAS parameters depending on their volume, flight altitude, climbing rate, and gas type (air, helium, phlegmatized hydrogen) are studied. The presented table and graphic interpretations of the GAS calculated parameters of the airships of different purpose in a wide range of their dimensions allow develop some practical recommendations for selecting the geometrical and physical parameters of the basic GAS elements. These findings can be used by the aircraft community in developing advanced models of the aeronautic equipment.

Ключевые слова: воздухоплавание, дирижабль, воздушно – газовая система, методика расчета, адиабатический процесс, программное обеспечение, формирование облика дирижабля.

Keywords: aerostatics, airship, gas – air system, calculation method, adiabatic process, software, airship conceptual design.

Введение. Аэростатический принцип создания подъемной (архимедовой) силы используется тремя классами летательных аппаратов (ЛА) легче воздуха: свободными аэростатами (газовыми и тепловыми), привязными аэростатами и

*Работа выполнена выполнена по соглашению о предоставлении субсидии Министерством образования и науки РФ в целях реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы». Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEF157614X0058.
**e-mail: kirilinalexander@mail.ru, lenivec88@mail.ru
*** The research is done under the agreement on granting the Federal Target Program "R&D on priority development fields of the science and technology sector of Russia for 2014 – 2020" by the RF Ministry of Education and Science. Unique identifier for applied scientific research (project) is RFMEF157614X0058.

дирижаблями [1, 2]. Предметом изучения данной работы являются дирижабли, а точнее — наиважнейшая из систем — воздушно-газовая [3].

Аэростатический принцип полета базируется на законе Архимеда и физических свойствах газов. Так как аэростатическая подъемная сила дирижабля напрямую зависит от разности плотностей воздуха и несущего газа (гелия или водорода), то разработчики воздухоплавательной техники должны уделять первостепенное внимание зависимости плотности газов от физических параметров атмосферы и стратосферы.

Известно, что плотность воздуха преимущественно зависит от давления и температуры. Температура воздуха имеет суточные и сезонные колебания, давление и температура воздуха очень сильно зависят от высоты, на которой выполняется полет. По этим причинам объемные соотношения между несущим газом и воздухом в корпусе дирижабля постоянно меняются. Несущий газ, в силу того, что он «отвечает» за подъемную силу и к тому же имеет высокую стоимость, по массе остается неизменным, но меняется по объёму — расширяется при увеличении температуры или подъеме на высоту и, наоборот, сужается при обратных процессах [4]. Свободную от несущего газа часть объема корпуса заполняет воздух. При этом он выполняет очень важные функции:

- служит балластом, изменяя, как того требует ситуация, полетную массу дирижабля [5, 6];
- обеспечивает гарантированный уровень сверхдавления в оболочке для возможности восприятия аэродинамических нагрузок;
- управляет температурными параметрами ВГС и др.

Из вышесказанного можно заключить: дирижабль представляет собой «живой организм», в котором происходят сложные физические процессы, контролируемые ВГС.

Воздушно-газовая система дирижаблей нового поколения должна обладать многогранными функциональными возможностями, общий перечень которых представлен на рис. 1.

Известные на сегодня работы в области ВГС дирижаблей преимущественно посвящены разработке газовых клапанов [7–9]. Расчет расхода газа через клапаны ведется по упрощенным зависимостям, не учитывающим неоднородность изменения давления и температуры газов с подъемом на высоту, что особенно важно для высотных и стратосферных дирижаблей [7, 10].

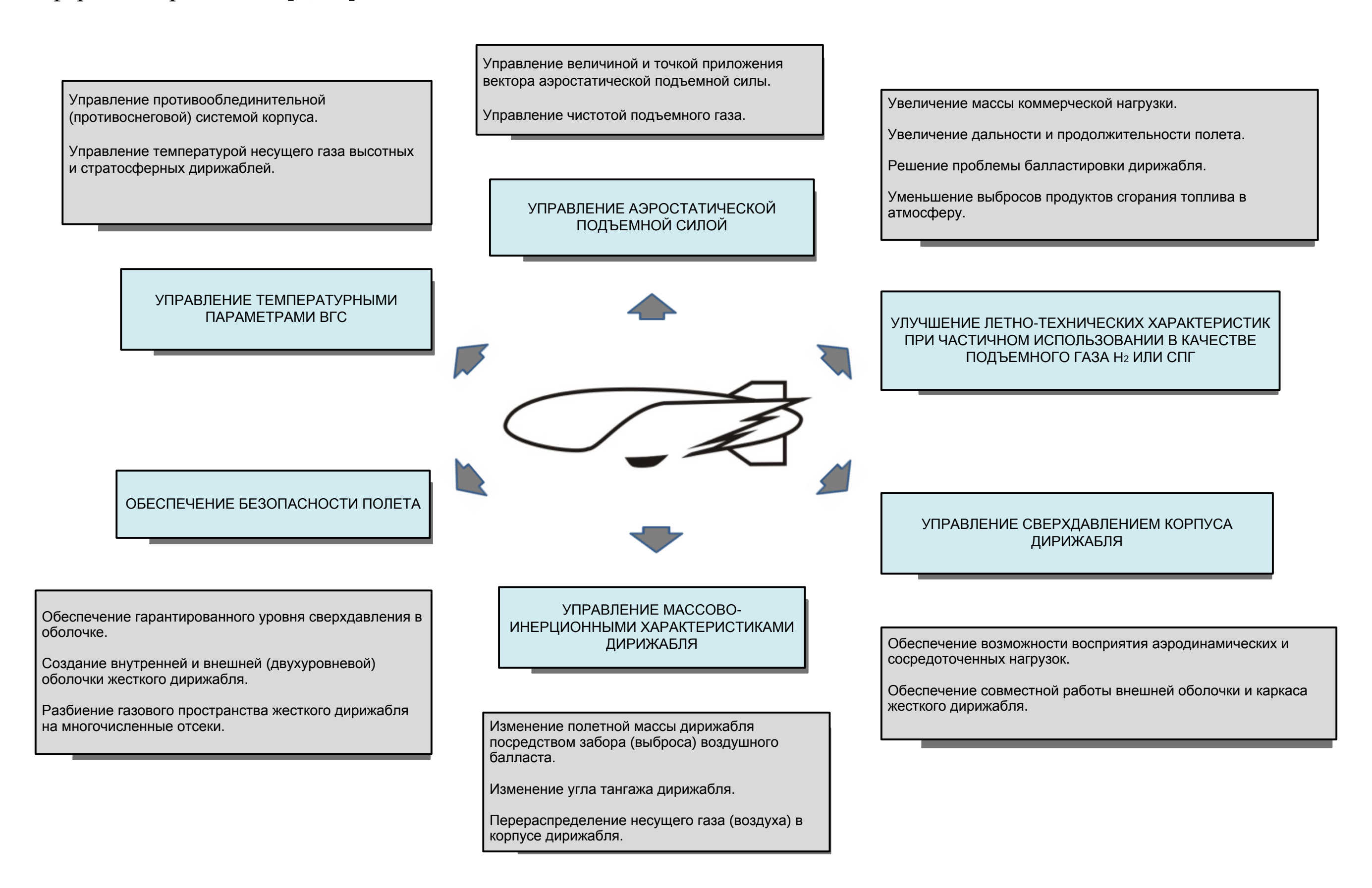


Рис.1. Функциональные возможности воздушно-газовой системы дирижабля

Целями настоящей работы являются:
- методическое обеспечение проектирования ВГС дирижаблей нового поколения;
- разработка практических рекомендаций по выбору геометрических и физических параметров основных элементов ВГС.

Достижение поставленных целей в работе осуществлено на основе решения следующих задач:

1. Разработка методики проектирования основных параметров ВГС многоцелевых, транспортных и высотных (в том числе стратосферных) дирижаблей;

2. Разработка блока «Аэростатика», как составной части программного комплекса по предварительному формированию технико-экономического облика дирижабля;

3. Определение основных параметров ВГС дирижабля в зависимости от его объема, высоты полета, скороподъемности и типа газа;

4. Разработка практических рекомендаций по заданию геометрических и физических параметров воздушных и газовых клапанов.

Методика проектирования геометрических и физических параметров элементов ВГС дирижаблей. Основными элементами ВГС являются: внешняя оболочка, газовые баллоны (мешки), автоматические воздушные и газовые клапаны, воздушные и газовые нагнетатели (вентиляторы, винты), трубопроводы подачи и перераспределения несущего газа, устройство для очистки подъемного газа, датчики температуры и давления, система управления ВГС [1,11]. Особое место в этом перечне занимают воздушные и газовые клапаны, воздушные вентиляторы.

Газовые клапаны используются для выпуска несущего газа из газовых отсеков с целью уменьшения подъемной силы (спуска аппарата) или, во избежание разрушения газовых отсеков при их полном выполнении, от чрезмерного избыточного давления газа. Воздушные клапаны предназначены для выпуска воздуха из баллонетов в окружающую среду. Воздушные вентиляторы — для нагнетания воздуха в корпус дирижабля [10].

С технологической точки зрения правильный расчет площади сечения клапанов играет важную роль для эксплуатации дирижабля и безопасности полета.

Рассмотрим эволюцию дирижабля, а именно его подъем или спуск с высоты H_1 на высоту H_2. Известно, что с подъемом на высоту до 11 км температура атмосферного воздуха понижается в среднем на 6,5 °С на 1000 м. Если пренебречь этим незначительным изменением температуры, то есть считать происходящие при эволюции ЛА процессы изотермическими, то согласно закону Бойля-Мариотта можно записать:

$$\frac{U_{H_2}}{U_{H_1}} = \frac{p_{H_1}}{p_{H_2}} \text{ или } U_{H_2} = \frac{p_{H_1}}{p_{H_2}} \cdot U_{H_1} \text{ или } p_{H_1} \cdot U_{H_1} = p_{H_2} \cdot U_{H_2} = const\,, \quad (1)$$

где U_{H_1}, U_{H_2} – объем газа в газовых отсеках на высоте H_1 и H_2 соответственно, м^3;

p_{H_1}, p_{H_2} – давление воздуха на высоте H_1 и H_2, Па.

Тогда изменение объема несущего газа в дирижабле при его эволюции будет равно:

$$\text{при подъеме } \Delta U = U_{H_2} - U_{H_1} = \frac{p_{H_1}}{p_{H_2}} \cdot U_{H_1} - U_{H_1} = U_{H_1} \cdot \left(\frac{p_{H_1}}{p_{H_2}} - 1 \right), \quad (2)$$

$$\text{при спуске } \Delta U = U_{H_1} - U_{H_2} = U_{H_1} - \frac{p_{H_1}}{p_{H_2}} \cdot U_{H_1} = U_{H_1} \cdot \left(1 - \frac{p_{H_1}}{p_{H_2}} \right). \quad (3)$$

Введем поправочный коэффициент λ, учитывающий изменение температуры по высоте. В этом случае выражения (2) и (3) примут следующий вид:

$$\text{при подъеме } \Delta U = \lambda_1 \cdot U_{H_1} \cdot \left(\frac{p_{H_1}}{p_{H_2}} - 1 \right), \quad (4)$$

$$\text{при спуске } \Delta U = \lambda_2 \cdot U_{H_1} \cdot \left(1 - \frac{p_{H_1}}{p_{H_2}} \right). \quad (5)$$

До высоты 11 км $\lambda_1 = 1{,}023$, $\lambda_2 = 0{,}997$. С 11 до 20 км значения температуры воздуха в соответствии со стандартной атмосферой не меняется, поэтому $\lambda_1 = \lambda_2 = 1{,}0$.

Выразим давление воздуха на высоте H_2 через p_{H_1} и V_y, используя численные значения параметров стандартной атмосферы [12], а именно значения dP/dH:

$$\text{при подъеме} \quad p_{H_2} = p_{H_1} - V_y \cdot \Delta t \cdot dp / dH, \qquad (6)$$

$$\text{при спуске} \quad p_{H_2} = p_{H_1} + V_y \cdot \Delta t \cdot dp / dH, \qquad (7)$$

где V_y — скороподъемность ЛА, м/сек, Δt – временной промежуток, сек.

Расчётные значения параметра *dP/dH* для различных уровней высоты сведены в таблицу 1.

Подставляя зависимости (6–7) в формулы (4–5), получим:

$$\Delta U = \lambda_1 \cdot U_{H_1} \cdot \left(\frac{p_{H_1}}{p_{H_1} - V_y \cdot \Delta t \cdot dp / dH} - 1 \right) \text{ — при подъеме,} \qquad (8)$$

$$\Delta U = \lambda_2 \cdot U_{H_1} \cdot \left(1 - \frac{p_{H_1}}{p_{H_1} + V_y \cdot \Delta t \cdot dp / dH} \right) \text{ — при спуске.} \qquad (9)$$

Таблица 1

Значения $\Delta p / \Delta H$ для различных уровней высоты
(для параметров стандартной атмосферы)

H, км	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8
P_H, кПа	101,33	89,88	79,50	70,12	61,66	54,05	47,22	41,11
$\Delta p/\Delta H$, Па/м	11,45	10,37	9,38	8,46	7,61	6,83	6,11	5,45
H, км	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16
P_H, кПа	35,65	30,80	26,50	22,70	19,40	16,58	14,17	12,11
$\Delta p/\Delta H$, Па/м	4,85	4,3	3,8	3,3	2,82	2,41	2,06	1,76
H, км	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24
P_H, кПа	10,35	8,85	7,56	6,47	5,53	4,73	4,05	3,47
$\Delta p/\Delta H$, Па/м	1,5	1,28	1,1	0,94	0,8	0,68	0,58	0,50

Зная ΔU, легко определить потребную суммарную площадь *S* входных (выходных) сечений газовых и воздушных клапанов, воздушных вентиляторов:

$$S = \frac{\Delta U}{\mu \cdot V_{ист}}, \qquad (10)$$

где $V_{ист}$ — скорость истечения (нагнетания) газа;
μ — безразмерный коэффициент расхода, зависящий от характера отверстия, обычно μ равно 0,4–0,7.

Скорость истечения газа зависит от его удельной массы и избыточного давления в ВГС и определяется по формуле Бернулли:

$$V_{ист} = \sqrt{\frac{2\Delta p_{ВГС}}{\rho_{H_2}}}, \qquad (11)$$

где ρ_{H_2} – плотность газа на высоте H_2, кг/м^3;
$\Delta p_{ВГС}$ – избыточное давление в элементах воздушно-газовой системы, Па.

Подставляя (8), (9) и (11) в (10), получим

$$\text{при подъеме} \quad s = \frac{\lambda_1 \cdot U_{H_1} \cdot \left(\frac{p_{H_1}}{p_{H_1} - V_y \cdot \Delta t \cdot dp / dH} - 1 \right)}{\mu \cdot \sqrt{2\Delta p_{ВГС} / \rho_{H_2}}}, \qquad (12)$$

$$\text{при спуске} \quad s = \frac{\lambda_2 \cdot U_{H_1} \cdot \left(1 - \frac{p_{H_1}}{p_{H_1} + V_y \cdot \Delta t \cdot dp / dH} \right)}{\mu \cdot \sqrt{2\Delta p_{ВГС} / \rho_{H_2}}}. \qquad (13)$$

Определив необходимую суммарную площадь входного (выходного) сечения и задавшись потребным количеством воздушных или газовых клапанов, можно определить размер «живого» сечения клапана:

$$S_{кл} = \frac{s}{n}, \qquad (14)$$

где n — количество клапанов.

Следует заметить, что формула (1) в общем виде для политропного процесса имеет следующий вид:

$$p \cdot U^n = const \,, \tag{15}$$

где n — показатель политропы, который равен

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_U} \,, \tag{16}$$

здесь c — теплоемкость газа в данном процессе; c_p и c_U — теплоёмкости того же газа при постоянном давлении и объеме соответственно.

Для изотермического процесса показатель политропы $n = 1$, для адиабатического процесса $n = k$ (где k — показатель адиабаты) [13].

В крейсерском полёте температура несущего газа и воздуха в корпусе дирижабля близка к температуре атмосферного воздуха. Поэтому можно считать, что функционирование воздушно-газовой системы ЛА происходит без теплообмена газа с окружающей средой, то есть имеет место адиабатический процесс.

Продифференцируем формулу, характерную для адиабатического процесса $p \cdot U^k = a$, по времени t:

$$\frac{d\left(U^k\right)}{dt} = \frac{d\left(\frac{a}{p}\right)}{dt} \,, \tag{17}$$

$$k \cdot U^{(k-1)} \cdot \frac{dU}{dt} = \frac{d\left(\frac{a}{p}\right)}{dt} \,, \tag{18}$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{k \cdot U^{(k-1)}} \cdot \frac{d\left(\frac{a}{p}\right)}{dt} \,. \tag{19}$$

Легко видеть, что при реализации адиабатического процесса изменение объема будет происходить с учетом поправочного коэффициента $1/k$ и формулы (12) и (13) примут следующий вид:

$$\text{при подъеме} \quad s = \frac{\lambda_1 \cdot U_{H_1} \cdot \left(\frac{p_{H_1}}{p_{H_1} - V_y \cdot \Delta t \cdot dp/dH} - 1 \right)}{\mu \cdot k \cdot \sqrt{2\Delta p_{ВГС} / \rho_{H_2}}} \,, \tag{20}$$

$$\text{при спуске} \quad s = \frac{\lambda_2 \cdot U_{H_1} \cdot \left(1 - \frac{p_{H_1}}{p_{H_1} + V_y \cdot \Delta t \cdot dp/dH} \right)}{\mu \cdot k \cdot \sqrt{2\Delta p_{ВГС} / \rho_{H_2}}} \,. \tag{21}$$

Заметим, что $1 < k < 2$, так как

$$k = \frac{c_p}{c_U} = \frac{c_U + R}{c_U} = 1 + \frac{R}{c_U} = \frac{c_p}{c_p - R} \,, \tag{22}$$

где R — универсальная газовая постоянная.

При температуре 20º C данный показатель адиабаты k имеет следующие значения для основных газов ВГС дирижабля: для воздуха — $k_{возд} = 1{,}4$; для гелия — $k_г = 1{,}66$; для водорода — $k_{вод} = 1{,}41$. Показатель k при других значениях температуры t меняется незначительно [14].

Расчетный блок «Аэростатика» как составная часть программного комплекса формирования облика дирижабля. Для расчета технико-экономических параметров дирижаблей нового поколения научно-производственной фирмой «Аэростатика» был разработан программный комплекс.

Программный комплекс состоит из самостоятельных рабочих модулей (подпрограмм) и управляющей (основной) программы, организующей весь процесс проектирования дирижабля в целом. Массивы исходных данных формируются для каждого блока в отдельности и сводятся в обобщенный файл с исходными данными. Данные из этого файла считываются в управляющую (основную) программу. Пакет рабочих модулей (подпрограмм) включает в себя следующие блоки: предварительного (начального) выбора параметров, геометрии, аэростатики, аэродинамического расчета, силовой установки, расчета масс, динамики, летно-технических характеристик, экономики и эффективности (рис. 3).

Полученные в результате работы программного комплекса параметры дирижаблей сводятся в три обобщенных файла с расширениями *.ltx (летно-технические параметры), *.eco (экономические параметры), *.res (все результирующие параметры).

Аэростатический блок разработанного ранее программного комплекса формирования облика дирижабля позволял лишь определить аэростатическую подъемную силу воздухоплавательного летательного аппарата. Проведенные же в данной работе исследования существенно расширили функциональные возможности аэростатического блока и разрешили проблему по определению физических и геометрических параметров ВГС дирижабля. На рис. 3 пунктирной линией отмечена расширенная область функциональных возможностей блока аэростатики в модернизированном программном комплексе.

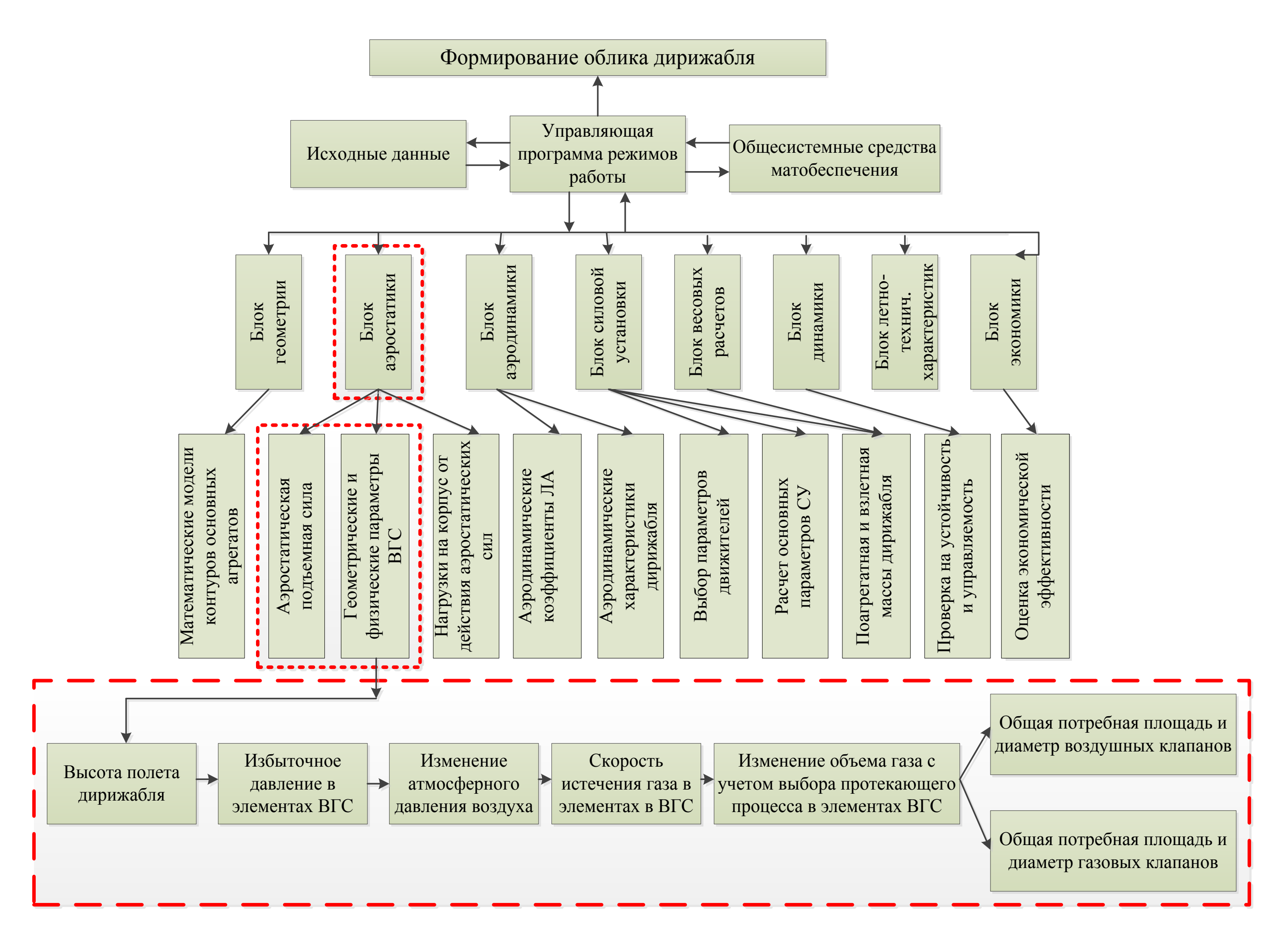


Рис. 2. Структурно-функциональная схема программного комплекса формирования облика дирижабля

Модернизированный программный комплекс формирования облика дирижабля был написан на языке программирования С++ в среде разработки Embarcadero RAD Studio с применением основных концепций объектно-ориентированного программирования.

По данному РИД «Программный комплекс по формированию технико-экономических параметров транспортных дирижаблей нового поколения» подана заявка №2014Э16337 в Федеральный институт промышленной собственности (ФИПС) на регистрацию программы для ЭВМ.

Результаты проектирования геометрических и физических параметров ВГС дирижабля. С помощью обозначенного выше программного комплекса были проведены исследования по зависимости основных параметров ВГС дирижабля от его объема, высоты полета, скороподъемности, заданного уровня избыточного давления в ВГС и типа газа (воздух, гелий, флегматизированный водород). Основные результаты исследований представлены в таблицах 2–4 и на рис. 3.

Таблица 2

Расчетные значения общей потребной площади воздушных клапанов при подъеме дирижабля, м^2 (V_y = 10м/с, Δp = 20 мм вод. ст.)

Высота полета, км	Объем дирижабля, тыс. м^3					
	10	26	60	100	350	1000
0	0,67	1,74	4,01	6,67	23,41	66,89
3	0,61	1,58	3,65	6,08	21,27	60,78
7	0,54	1,4	3,23	5,38	18,83	53,81
12	0,42	1,1	2,52	4,19	14,68	41,94
15	0,33	0,86	1,99	3,31	11,59	33,13
20	0,22	0,58	1,34	2,23	7,8	22,29

Таблица 3

Расчетные значения общей потребной площади воздушных нагнетателей при спуске дирижабля, м^2 (V_y = 10м/с)

Высота полета, км	Δp, мм вод. ст.	Объем дирижабля, тыс. м^3					
		10	26	60	100	350	1000
0	100	0,30	0,78	1,79	2,99	10,47	29,92
	150	0,24	0,64	1,47	2,44	8,55	24,43
3	$100\cdot\bar{\rho}$	0,36	0,93	2,14	3,57	12,49	35,68
	$150\cdot\bar{\rho}$	0,29	0,76	1,75	2,91	10,2	29,13
7	$100\cdot\bar{\rho}$	0,38	0,99	2,29	3,82	13,38	38,2
	$150\cdot\bar{\rho}$	0,31	0,81	1,87	3,12	10,92	31,2
12	$100\cdot\bar{\rho}$	0,51	1,33	3,06	5,1	17,86	51,02
	$150\cdot\bar{\rho}$	0,42	1,08	2,5	4,17	14,58	41,67
15	$100\cdot\bar{\rho}$	0,51	1,33	3,06	5,1	17,86	51,02
	$150\cdot\bar{\rho}$	0,42	1,08	2,5	4,17	14,58	41,67
20	$100\cdot\bar{\rho}$	0,51	1,33	3,06	5,1	17,86	51,02
	$150\cdot\bar{\rho}$	0,42	1,08	2,5	4,17	14,58	41,67

Таблица 4

Расчетные значения общей потребной площади газовых (гелий) клапанов при подъеме дирижабля, м^2 (Δp = 20 мм вод. ст.)

Высота полета, км	V_y, м/с	Объем дирижабля, тыс. м^3					
		10	26	60	100	350	1000
0	10	0,21	0,54	1,26	2,10	7,33	20,95
	12,5	0,26	0,68	1,57	2,62	9,17	26,20
	15	0,31	0,82	1,89	3,14	11,01	31,45
3	10	0,19	0,50	1,14	1,90	6,66	19,04
	12,5	0,24	0,62	1,43	2,38	8,33	23,80
	15	0,29	0,74	1,71	2,86	10,00	28,57
7	10	0,17	0,44	1,01	1,69	5,90	16,86
	12,5	0,21	0,55	1,26	2,11	7,38	21,08
	15	0,25	0,66	1,52	2,53	8,86	25,30

Высота полета, км	$V_у$, м/с	Объем дирижабля, тыс. м^3					
		10	26	60	100	350	1000
12	10	0,13	0,34	0,79	1,31	4,60	13,14
	12,5	0,16	0,43	0,99	1,64	5,75	16,43
	15	0,20	0,51	1,18	1,97	6,90	19,72
15	10	0,10	0,27	0,62	1,04	3,63	10,38
	12,5	0,13	0,34	0,78	1,30	4,54	12,97
	15	0,16	0,41	0,93	1,56	5,45	15,58
20	10	0,07	0,18	0,42	0,70	2,44	6,98
	12,5	0,09	0,23	0,52	0,87	3,06	8,73
	15	0,10	0,27	0,63	1,05	3,67	10,48

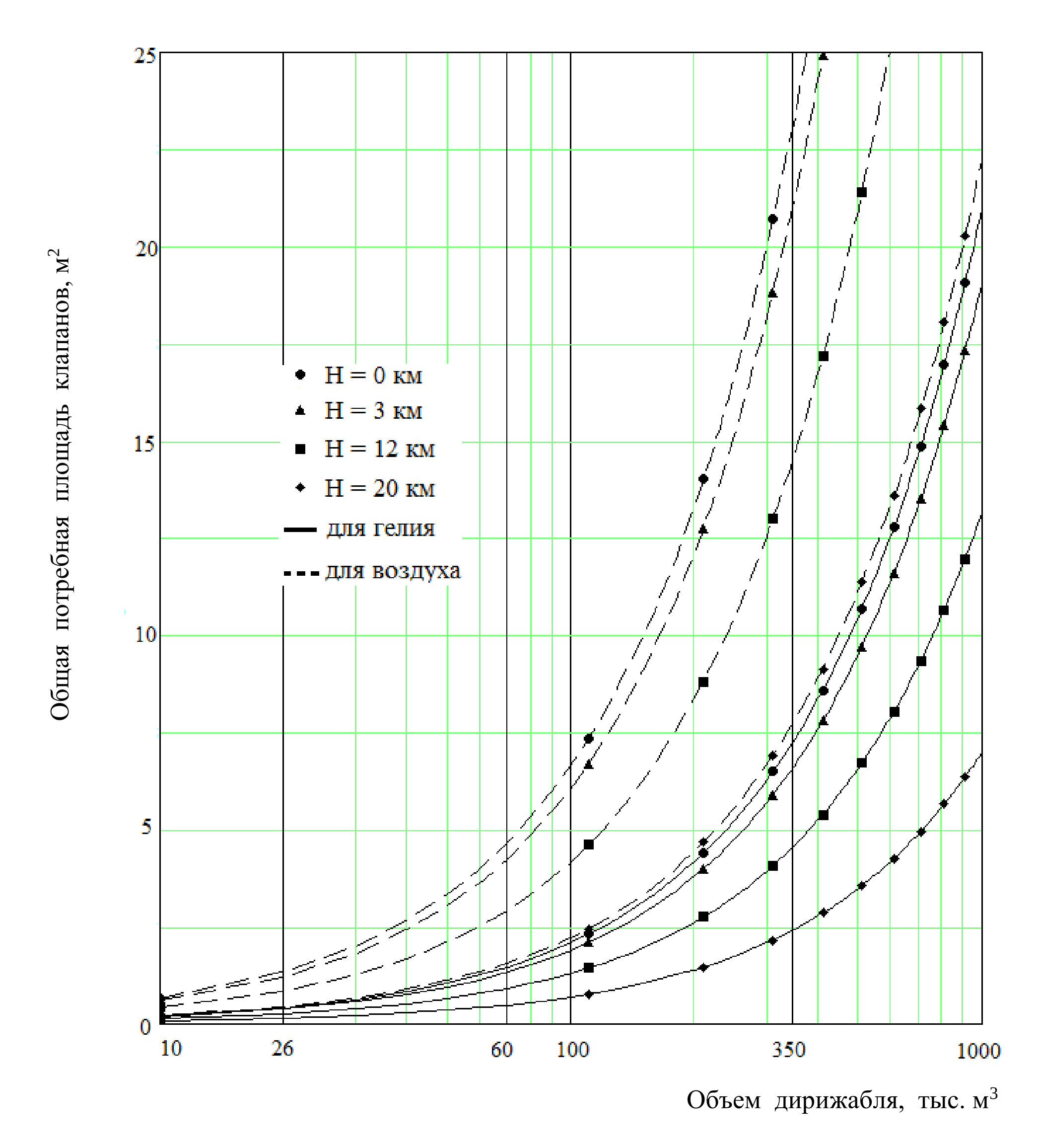


Рис. 3. Зависимости общей потребной площади воздушных и газовых (гелий) клапанов ВГС от объёма и высоты полёта дирижабля ($V_у$ = 10 м/с, Δp = 20 мм вод. ст.)

Заключение. Анализ полученных результатов позволяет обозначить практические рекомендации по выбору геометрических и физических параметров основных элементов ВГС дирижаблей:

1. Потребные значения площади газовых и воздушных клапанов находятся в прямо пропорциональной зависимости от объема дирижабля и его скороподъёмности;

2. Потребная площадь воздушных клапанов более чем в 3 раза должна превышать общую площадь сечения гелиевых клапанов (при одном и том же заданном избыточном давлении Δp). Если несущим газом летательного аппарата является флегматизированный водород, то площадь проходных сечений газовых клапанов может быть на 20% меньше, чем в случае заправки ВГС летательного аппарата гелием.

3. Для воздушных и газовых клапанов расчетным случаем является нулевая высота $H = 0$ км. Для воздушных нагнетателей — наоборот — максимальная высота полёта H_{max}, так как создаваемое воздушными вентиляторами давление будет прямо пропорционально $\overline{\rho}$, равному отношению плотности воздуха на расчётной высоте к плотности воздуха на высоте $H = 0$ км.

4. Увеличение задаваемого избыточного давления Δp в ВГС уменьшает площадь газовых клапанов. Но, несмотря на такую зависимость, разработчики воздухоплавательной техники должны минимизировать этот показатель, так как от него существенно зависит масса газовых отсеков и внешней оболочки корпуса дирижабля.

Практическая ценность данной работы заключается в разработке и внедрении усовершенствованного, многопараметрического блока «Аэростатика» в программный комплекс по формированию облика дирижаблей нового поколения.

Библиографический список

1. Кирилин, А. Н. Дирижабли / А. Н. Кирилин. — Москва : Маи-Принт, 2013. — С.34–201.

2. Multibody advanced airship for transport (MAAT). AIRSHIP, The Journal of the Airship Association, March 2012, pp. 11 – 13.

3. Craig, J., et al. Aerostatics. [Airship Technology, 2nd ed.] Cambridge university press, 2012, pp.188–208.

4. Нейдорф, Р. А. Исследование зависимости силы всплывания специализированного аэростата от параметров его движения / Р. А. Нейдорф, Ю. Л. Сигида // Вестник Дон. гос. техн. ун-та, 2013. — Т. 2, № 3–4 (72–73). — С.96–103.

5. Adams, Paul A. Aeroscraft — An Industry Game Changer. AIRSHIP, The Journal of the Airship Association. 2012, no.178, pp. 20 – 25.

6. Talesnikov, M. The latest development of Hybrid Airship Technology. [Proc. of the 9th International Airship Conf.] U.K.: published by the AIRSHIP ASSOCIATION, 2012, pp. 14 -25.

7. Лосик, С. А. Оборудование дирижаблей / С. А. Лосик, И. А. Козлов. — Москва : НКАП СССР, Государственное издательство оборонной промышленности, 1939. — С. 20–36.

8. Бойко, Ю. С. Инновации фирмы Цеппелин / Ю. С. Бойко, С. В. Федоров. — Феодосия : ООО «Экма+», 2008. — С. 74–88.

9. Smith, R. K. The airships Akron and Macon. Flying aircraft carriers of the United states Navy. USA, Maryland, Annapolis: United States Naval Institute, 1965, pp. 305-307.

10. Бойко, Ю. С. Воздухоплавание в изобретениях/ Ю. С. Бойко. — Москва : Транспорт, 1999. — С. 85–87.

11. Кудинов, Н. В. Модульный подход к компьютерному моделированию участка магистрального газопровода / Н. В. Кудинов, А. А. Болдырева // Вестник Дон. гос. техн. ун-та, 2010. — Т. 10, № 4 (47). — С.500–508.

12. Атмосфера стандартная. Параметры. ГОСТ 4401–81. — Москва : Издательство стандартов, 1981. — 179 с.

13. Савельев, И. В. Курс общей физики, т. 1. Механика. Молекулярная физика: Учебное пособие / И. В. Савельев. — 2-е изд., перераб. — Москва : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. — С.283–284.

14. White, F. M. Fluid Mechanics, 4th ed. New York: McGraw Hill, 2003, 1023 p.

References

1. Kirillin, A. N. Dirizhabli. [Airships.] Moscow: Mai-Print, 2013, pp. 34–201 (in Russian).

2. Multibody advanced airship for transport (MAAT). AIRSHIP, Airship Association Journal, March 2012, pp. 11 – 13.

3. Craig, J., et al. Aerostatics. [Airship Technology.] 2nd ed. Cambridge university press, 2012, pp.188–208.

4. Neydorf, R. A., Sigida, Y. L. Issledovanie zavisimosti sily vsplyvaniya spetsializirovannogo aerostata ot parametrov ego dvizheniya. [Research on buoyant force dependence of specialized aerostat on its motion variables.] Vestnik of DSTU, 2013, vol. 2, no. 3–4 (72–73), pp. 96–103 (in Russian).

5. Adams, Paul A. Aeroscraft — An Industry Game Changer. AIRSHIP, Airship Association Journal, 2012, no.178, pp. 20 – 25.

6. Talesnikov, M. The latest development of Hybrid Airship Technology. [Proc. of the 9th International Airship Conf.] U.K.: published by the AIRSHIP ASSOCIATION, 2012, pp. 14 -25.

7. Losik, S. A., Kozlov, I. A. Oborudovanie dirizhabley. [Airship equipment.] Moscow: NKAP SSSR, Gosudarstvennoe izdatel'stvo oboronnoy pro-myshlennosti, 1939, pp. 20–36 (in Russian).

8. Boyko, Y. S., Fedorov, S. V. Innovatsii firmy Tseppelin. [Innovation of Zeppelin Company.] Feodosiya: OOO «Ekma+», 2008, pp. 74–88 (in Russian).

9. Smith, R. K. The airships Akron and Macon. Flying aircraft carriers of the United states Navy. USA, Maryland, Annapolis: United States Naval Institute, 1965, pp. 305-307.

10. Boyko, Y. S. Vozdukhoplavanie v izobreteniyakh. [Aeronautics in inventions.] Moscow: Transport, 1999, pp. 85–87 (in Russian).

11. Kudinov, N. V., Boldyreva, A. A. Modul'nyy podkhod k komp'yuternomu modelirovaniyu uchastka magistral'nogo gazoprovoda.[Computer modeling of the cross-country gas pipeline section.] Vestnik of DSTU, 2010, vol. 10, no. 4 (47), pp. 500–508 (in Russian).

12. Atmosfera standartnaya. Parametry. GOST 4401–81. [GOST 4401–81: Standard atmosphere. Parameters.] Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1981, 179 p. (in Russian).

13. Savelyev, I. V. Kurs obshchey fiziki, t. 1. Mekhanika. Molekulyarnaya fizika: Uchebnoe posobie. [Course of General Physics, vol. 1. Mechanics. Molecular Physics: Study Guide.] 2nd rev.ed. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1982, pp. 283–284 (in Russian).

14. White, F. M. Fluid Mechanics, 4th ed. New York: McGraw Hill, 2003, 1023 p.

Поступила в редакцию 12.11.2014
Сдана в редакцию 13.11.2014
Запланирована в номер 28.01.2015

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 51: 621: 891 + 06 DOI 10.12737/10393

Стратификация смазочного материала в радиальных подшипниках *

М. А. Мукутадзе**
Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Stratification of lubricating material in radial bearings ***

M. A. Mukutadze**
Rostov State University of Transport, Rostov-on-Don, Russian Federation

Приводится методика расчёта радиальных подшипников скольжения бесконечной и конечной длины, работающих на стратифицированном двухслойном смазочном материале. Методика построена на использовании автомодельной переменной, что позволяет получить точное автомодельное решение задачи как в полярных, так и в цилиндрических координатах, а также значение параметра, характеризующего границу раздела стратифицированных слоёв. Приведённые задачи усложнены одновременным учётом зависимости вязкости смазочного материала от давления, наличием адаптированного к условиям трения опорного профиля подшипниковой втулки и влиянием осевой подачи смазочного материала в подшипнике конечной длины. Получены расчётные модели для двухслойных расслаивающихся смазочных материалов, численный анализ которых позволил установить влияние переменных факторов на основные рабочие характеристики подшипников — компоненты вектора несущей способности, силы трения и оптимальные значения параметра опорного профиля, подачи смазочного материала, его вязкостного соотношения в стратифицированных слоях.

Ключевые слова: Радиальный подшипник, двухслойный смазочный материал, осевая подача смазочного материала, зависимость вязкости от давления, несущая способность, сила трения, функции тока, автомодельное решение.

The technique of calculating the radial sliding bearings of infinite and finite length running on a double-layer stratified lubricant is presented. The technique is based on the use of the self-simulated variable that allows obtaining the exact self-similar problem solution both in polar and in cylindrical coordinates, as well as the parameter value characterizing the interface of the stratified layers. These tasks are complicated by the simultaneous consideration of the lubricant viscosity-pressure relation, the presence of the friction-adapted supporting profile of the bearing bush, and the effect of the axial lubricant feed in the finite-length bearing. As a result, computational models are obtained for two-layer stratified lubricants the numerical analysis of which allows establishing the impact of variables on the basic bearings performance – components of the bearing capacity vector, friction forces, as well as optimal values of the reference profile parameter, the lubricant supply, and its viscous ratio in the stratified layers.

Keywords: radial bearing, double-layer lubricant, axial lubricant feed, viscosity-pressure relation, bearing capacity, friction force, stream functions, self-similar solution.

Введение. Как известно [1–3], при наличии в смазочной жидкости частиц присадок или продуктов износа, а также за счет пристенной адсорбции и ориентации молекул, вблизи опорной поверхности подшипниковой втулки происходит стратификация смазочного материала на слои с различной вязкостью. Слоистое течение вязкой несжимаемой жидкости в зазоре упорного и радиального подшипников рассматривалось в работах [4–9]. Существенный недостаток существующих методик заключается в том, что в расчетной модели не учитывается зависимость вязкости от давления. При больших значениях давления в смазочном слое вязкость смазки существенно возрастает и возникает необходимость учета зависимости вязкости от давления.

Постановка задачи. Цель работы — разработать аналитический метод расчета радиальных подшипников, работающих на двухслойной смазке, с учетом зависимости ее вязкости от давления. Также необходимо оценить влияние вязкостного

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** e-mail: vm_2@kaf.rgups.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

отношения слоев; параметра, характеризующего границу раздела слоев на основные рабочие характеристики подшипника; параметра, обусловленного зависимостью вязкости от давления при осевой подаче смазки.

Задача № 1. Рассматривается течение двухслойного смазочного материала в зазоре радиального подшипника бесконечной длины. Вал вращается с угловой скоростью Ω, а подшипниковая втулка с адаптированным профилем опорной поверхности неподвижна. Зависимость вязкости от давления выражается формулой

$$\mu_i' = \mu_{0i} e^{\tilde{\alpha}^* p'}. \qquad (1.1)$$

В полярной системе координат с полюсом в центре вала (рис. 1. 1) уравнения контуров вала, границы раздела слоев и адаптированного контура опорной поверхности запишутся в виде:

$$c_0 : r' = r_0; \quad c_1 : r' = r_0 + \delta\alpha + \delta\alpha\cos\theta - \alpha A \sin\omega\theta;$$

$$c_2 : r' = r_2 + e\cos\theta - A\sin\omega\theta, \quad \text{где} \quad \alpha \in [0,1]. \qquad (1.2)$$

Здесь r_0 — радиус вала; r_2 — радиус подшипника; $r_0 + \delta\alpha$ — радиус границы раздела слоев; параметры A и ω характеризуют адаптированный профиль опорной поверхности.

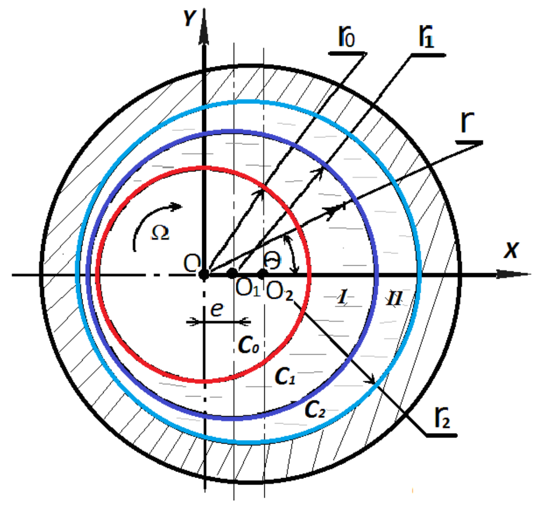


Рис. 1.1. Схема радиального подшипника с двухслойной стратификацией жидкого смазочного материала

Исходные уравнения и граничные условия. В качестве системы исходных уравнений берется безразмерное уравнение движения вязкой несжимаемой жидкости с учетом зависимости вязкости от давления и уравнение неразрывности

$$\frac{\partial^2 \upsilon_i}{\partial r^2} = e^{-\tilde{\alpha} p}\Lambda_i \frac{dp}{d\theta}, \quad \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial \upsilon_i}{\partial \theta} = 0 \quad (i = 1, 2), \qquad (1.3)$$

где размерные величины $r', u_i', \upsilon_i', p', \mu_i'$ связаны с безразмерными $r, u_i, \upsilon_i, p, \mu_i$ следующими соотношениями:

$$r' = r_0 + \delta r, \quad \upsilon_i' = \Omega r_0 \upsilon_i, \quad u_i' = \Omega\delta u_i, \quad p' = p_g p, \quad \mu_i' = \mu_{0i}\mu_i, \quad \delta = r_2 - r_0, \qquad (1.4)$$

где $\tilde{\alpha}$ — экспериментальная постоянная; μ_{0i} — характерные вязкости смазочных слоев; u_i', υ_i' — компоненты вектора скорости; Ω — угловая скорость вращения вала; p_g — характерное давление.

Система уравнений (1.3) решается при следующих граничных условиях:

$$u_1\big|_{r=0} = 0, \; \upsilon_1\big|_{r=0} = 1, \quad p(0) = p(2\pi) = 1,$$

$$u_2\big|_{r=h(\theta)} = 0, \quad \upsilon_2\big|_{r=h(\theta)} = 0; \quad u_1\big|_{r=\alpha h} = u_2\big|_{r=\alpha h}, \quad \upsilon_1\big|_{r=\alpha h} = \upsilon_2\big|_{r=\alpha h};$$

$$\frac{\partial \upsilon_1}{\partial r}\Big|_{r=\alpha h} = \frac{\mu_{02}}{\mu_{01}}\frac{\partial \upsilon_2}{\partial r}\Big|_{r=\alpha h}, \quad \frac{u_i}{\upsilon_i}\Big|_{r=\alpha h} = \alpha h'(\theta),$$

$$h(\theta) = 1 + \eta\cos\theta - \eta_1 \sin\omega\theta, \quad \eta = e/\delta, \quad \eta_1 = A/\delta. \qquad (1.5)$$

Точное автомодельное решение. Точное автомодельное решение системы уравнений (1.3), удовлетворяющее граничным условиям (1.5), будем искать, используя функцию тока, предполагая, что поле скоростей и давлений в смазочном слое является потенциальным:

$$u_i = -\frac{\partial \psi_i}{\partial \theta} + U_i(r,\theta), \quad \upsilon_i = \frac{\partial \psi}{\partial r} + V_i(r,\theta), \quad \psi_i = \tilde{\psi}_i(\xi),$$

$$U_i(r,\theta)=-\tilde{u}_i(\xi)h'(\theta),\quad V_i(r,\theta)=\tilde{\upsilon}_i(\xi),\quad \xi=\frac{r}{h(\theta)},\quad \frac{\Lambda_1}{e^{\tilde{\alpha}p}}\frac{dp_1}{d\theta}=\frac{\tilde{c}_1}{h^2(\theta)}+\frac{\tilde{c}_2}{h^3(\theta)},$$

$$\frac{\Lambda_2}{e^{\tilde{\alpha}p}}\frac{dp_2}{d\theta}=\frac{\tilde{\tilde{c}}_1}{h^2(\theta)}+\frac{\tilde{\tilde{c}}_2}{h^3(\theta)}, \tag{1.6}$$

где $\tilde{c}_1=\frac{\mu_{02}}{\mu_{01}}\tilde{\tilde{c}}_1,\quad \tilde{c}_2=\frac{\mu_{02}}{\mu_{01}}\tilde{\tilde{c}}_2.$

Осуществляя подстановку (1.6) в (1.3) и (1.5), получим:

$$\tilde{\psi}_1'''=\tilde{c}_2,\quad \tilde{\upsilon}_1''=\tilde{c}_1,\quad \tilde{u}_1'+\xi\upsilon_1'=0,\quad \tilde{\psi}_2'''=\tilde{\tilde{c}}_2,\quad \tilde{\tilde{\upsilon}}_2=\tilde{\tilde{c}}_1,\quad \tilde{u}_2'+\xi\upsilon_2'=0, \tag{1.7}$$

$$\tilde{\psi}_1'(0)=0;\quad \tilde{u}_1(0)=0,\quad \tilde{\upsilon}_1(0)=1,\quad \psi_2'(1)=0,\quad \tilde{u}_2(1)=0,$$

$$\tilde{\upsilon}_2(1)=0,\quad \tilde{\psi}_1'(\alpha)=\tilde{\psi}_2'(\alpha),\quad \tilde{\upsilon}_1(\alpha)=\tilde{\upsilon}_2(\alpha),\quad \tilde{u}_1(\alpha)=\tilde{u}_2(\alpha),$$

$$\upsilon_1'(\alpha)=\frac{\mu_2}{\mu_1}\tilde{\upsilon}_2'(\alpha),\quad \tilde{\psi}_1''(\alpha)=\frac{\mu_2}{\mu_1}\psi_2''(\alpha),\quad \int_0^\alpha\tilde{\upsilon}_1(\xi)+\int_\alpha^1\tilde{\upsilon}_2(\xi)d\xi=0. \tag{1.8}$$

Решение задачи (1.7)–(1.8) находится с помощью непосредственного интегрирования. В результате получим:

$$\tilde{\psi}_1'=\tilde{c}_2\frac{\xi^2}{2}+c_2\xi+c_3,\quad \tilde{\upsilon}_1=\tilde{c}_1\frac{\xi^2}{2}+c_6\xi+c_7,$$

$$\tilde{\psi}_2'=\tilde{\tilde{c}}_2\frac{\xi^2}{2}+c_4\xi+c_5,\quad \tilde{\upsilon}_2=\tilde{\tilde{c}}_1\frac{\xi^2}{2}+c_8\xi+c_9,$$

$$\tilde{u}_1=-\tilde{c}_1\frac{\xi^3}{3}-c_6\frac{\xi^2}{2}+c_{10},\quad \tilde{u}_2=-\tilde{\tilde{c}}_1\frac{\xi^3}{3}-c_8\frac{\xi^2}{2}+c_{11},$$

$$\Lambda_1e^{\tilde{\alpha}p}=\Lambda_1e^{\tilde{\alpha}}-\tilde{\alpha}\left[\tilde{c}_1J_2(\theta)+\tilde{c}_2J_3(\theta)\right],\quad \Lambda_2e^{\tilde{\alpha}p}=\Lambda_2e^{\tilde{\alpha}}-\tilde{\alpha}\left[\tilde{\tilde{c}}_1J_2(\theta)+\tilde{\tilde{c}}_2J_3(\theta)\right],$$

$$J_K(\theta)=\int_0^0\frac{d\theta}{(1+\eta\cos\theta-\eta_1\sin\omega\theta)^K}. \tag{1.9}$$

Для определения постоянных $c_i(i=2,3,...,11)\,\tilde{c}_1,\tilde{c}_2,\tilde{\tilde{c}}_1,\tilde{\tilde{c}}_2$ используется следующая алгебраическая система из 14 уравнений с 14 неизвестными:

$$c_7=1,\quad c_{10}=0,\quad c_3=0,$$

$$-\tilde{\tilde{c}}_1\frac{1}{3}-c_8\frac{1}{2}+c_{11}=0,\quad \tilde{\tilde{c}}_1\frac{1}{2}+c_8+c_9=0,\quad \tilde{\tilde{c}}_2\frac{1}{2}+c_4+c_5=0,$$

$$\tilde{c}_1=\frac{\mu_2}{\mu_1}\tilde{\tilde{c}}_1,\quad \tilde{c}_2=\frac{\mu_2}{\mu_1}\tilde{\tilde{c}}_2,\quad \tilde{\tilde{c}}_2=-\frac{\tilde{\tilde{c}}_1J_2(2\pi)}{J_3(2\pi)},$$

$$\tilde{c}_1\alpha+c_6=\frac{\mu_2}{\mu_1}\left(\tilde{\tilde{c}}_1\alpha+c_8\right),\quad \tilde{c}_2\alpha+c_2=\frac{\mu_2}{\mu_1}\left(\tilde{\tilde{c}}_2\alpha+c_4\right),$$

$$\tilde{c}_2\frac{\alpha^2}{2}+c_2\alpha+c_3-\tilde{\tilde{c}}_2\frac{\alpha^2}{2}-c_4\alpha-c_5=0;$$

$$\tilde{c}_1\frac{\alpha^2}{2}+c_6\alpha+c_7-\tilde{\tilde{c}}_1\frac{\alpha^2}{2}-c_8\alpha-c_9=0,$$

$$\tilde{c}_1\frac{\alpha^3}{6}+c_6\frac{\alpha^2}{2}+c_7\alpha-\tilde{\tilde{c}}_1\frac{\alpha^3}{6}-c_8\frac{\alpha^2}{2}-c_9\alpha+\tilde{\tilde{c}}_1\frac{1}{6}+c_8\frac{1}{2}+c_9=0. \tag{1.10}$$

С учетом (1.4) гидродинамическое давление p определяется следующим выражением:

$$p=1+\left(1+\frac{\tilde{\alpha}}{2}\right)\frac{\tilde{c}_1}{\Lambda_1}\eta\sin\theta\quad \text{или}\quad p=1+\left(1+\frac{\tilde{\alpha}}{2}\right)\frac{\tilde{\tilde{c}}_1}{\Lambda_2}\eta\sin\theta. \tag{1.11}$$

Записывая систему (1.10) в матричной форме, получим:

$$M \cdot \vec{x} = \vec{b}, \qquad (1.12)$$

где $\vec{x} = \{\tilde{\tilde{c}}_1;\ c_4;\ c_5;\ c_8;\ c_9\}$, $\vec{b} = \{0{,}0, -6\alpha; 0; -2\}$,

$$M = \begin{vmatrix} -\dfrac{J_2(2\pi)}{J_3(2\pi)} & 2 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 2 & 2 \\ k\alpha^3 - \alpha^3 + 1 & 0 & 0 & 3k\alpha^2 - 3a^2 + 3 & 6 - 6\alpha \\ (1-k)\alpha^2 \dfrac{J_2(2\pi)}{J_3(2\pi)} & 2\alpha(k-1) & -2 & 0 & 0 \\ \alpha^2(k-1) & 0 & 0 & 2\alpha(k-1) & -2 \end{vmatrix}.$$

Решая систему (1.12), получим

$$\tilde{\tilde{c}}_1 = \frac{6 + 6k\alpha^2 - 6\alpha^2}{\Delta}, \quad c_4 = \frac{\dfrac{J_2(2\pi)}{J_3(2\pi)}(3 - 6\alpha^2 - \beta^*\alpha^2 + 3\alpha^4 - \alpha\beta^* + 3k^2\alpha^4 - 6k\alpha^4)}{(\alpha k - \alpha + 1)\Delta},$$

$$c_5 = \frac{-\dfrac{J_2(2\pi)}{J_3(2\pi)}\alpha(-3\alpha^2 - 3\alpha + 3\alpha^3 + 3 + 6k\alpha^2 - 3k + 3\alpha^3 k^2 - 3\alpha^2 k^2 - 6k\alpha^3 + 3\alpha k)}{(\alpha k - \alpha + 1)\Delta},$$

$$c_8 = \frac{4 - 4\alpha^3 + 4k\alpha^3}{\Delta}, \quad c_9 = \frac{-4\alpha^3 + 4k\alpha^3 - 3k\alpha^2 + 3\alpha^2 + 1}{\Delta}, \quad c_2 = kc_4, \quad c_6 = kc_8,$$

$$\Delta = -4\alpha^3 + 1 + \alpha^4 - 6k\alpha^2 + 4k\alpha^3 + k^2\alpha^4 + 4k\alpha - 2k\alpha^4 - 4\alpha + 6\alpha^2,$$

$$\frac{J_2(2\pi)}{J_3(2\pi)} = 1 + \frac{\eta_1}{2\pi\omega}(\cos 2\pi\omega - 1), \quad \tilde{c}_2 = -\tilde{c}_1\left(1 + \frac{\eta_1}{2\pi\omega}(\cos 2\pi\omega - 1)\right),$$

$$\tilde{c}_1 = k\tilde{\tilde{c}}_1, \quad \tilde{\tilde{c}}_2 = -\tilde{\tilde{c}}_1 \frac{J_2(2\pi)}{J_3(2\pi)}. \qquad (1.13)$$

Основные рабочие характеристики подшипника. Нормализованные показатели расходов Q_1 и Q_2 двухслойной смазочной жидкости определяются выражениями

$$Q_1 = \tilde{c}_2 \frac{\alpha^3}{6} + c_2 \frac{\alpha^2}{2} + c_3\alpha, \quad Q_2 = \frac{\tilde{\tilde{c}}_2}{6} + \frac{c_4}{2} + c_5 - c_6\frac{\alpha_3}{6} - c_4\frac{\alpha^2}{2} - c_5\alpha. \qquad (1.14)$$

Используя формулы (1.13) и (1.14) для компонент нормализованной поддерживающей силы и нормализованной силы трения, придем к следующим выражениям:

$$\tilde{R}_y = \frac{R_y}{r_0 p_g} = \int_0^{2\pi} \frac{dp}{d\theta}\cos\theta d\theta = \frac{\tilde{c}_1}{\Lambda_1}\left[\pi\eta + \frac{\eta_1}{2\omega}\left[\frac{\cos(\omega-1)2\pi - 1}{\omega+1} + \frac{\cos(\omega+1)2\pi - 1}{\omega+1}\right]\right]\left(1 + \frac{\tilde{\alpha}}{2}\right),$$

$$\tilde{R}_x = \frac{\tilde{R}_x}{p_g r_0} = -\int_0^{2\pi} \frac{2p}{2\theta}\sin\theta d\theta = -\frac{\tilde{c}_1\eta_1}{\Lambda_1 2\omega}\left[\frac{\sin(\omega-1)2\pi}{\omega-1} - \frac{\sin(\omega+1)2\pi}{\omega+1}\right]\left(1 + \frac{\tilde{\alpha}}{2}\right),$$

$$\tilde{L}_{тр} = \frac{\tilde{L}_{тр}\delta}{\mu_1\omega r_0^3} = \int_0^{2\pi}\left(\frac{\tilde{\psi}_1''}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{\upsilon}'}{h(\theta)}\right)_{\xi=0} e^{\tilde{\alpha}p}d\theta. \qquad (1.15)$$

Итоги численного анализа полученных аналитических выражений для базовых эксплуатационных характеристик узла трения показывают следующее:

– при значении вязкостного параметра $\alpha \in [0, 1]$ несущая способность достигает максимума при величине параметра контура профиля $\omega = ½$;

– с увеличением вязкостного параметра α несущая способность подшипника возрастает на 5–10 %.

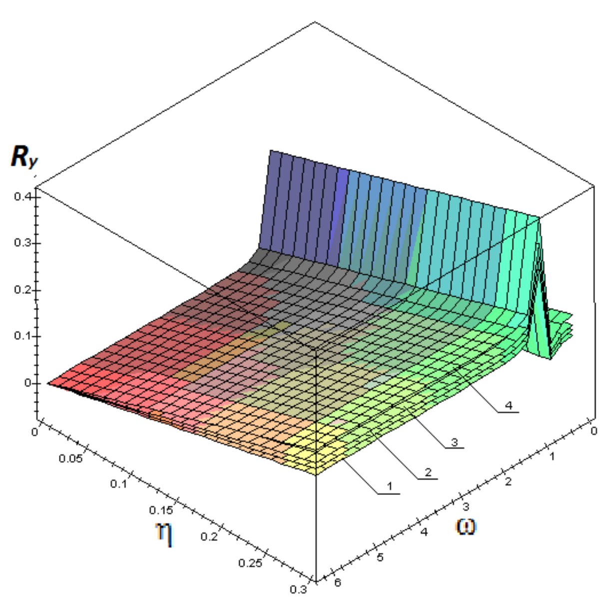


Рис. 1.2. Зависимость вертикальной компоненты безразмерной несущей способности R_y от параметра эксцентриситета η и параметра адаптивного профиля ω: *1* – α = 0,1; *2* – α = 0,2; *3* – α = 0,5; *4* – α = 0,9

Задача №2. Рассматривается установившееся течение двухслойной смазки в зазоре радиального подшипника конечной длины. Вал вращается с постоянной угловой скоростью Ω, а подшипниковая втулка неподвижна. Подача смазочного материала осуществляется в осевом направлении, а его вязкость выражается следующей экспоненциальной зависимостью от давления:

$$\mu_i' = \mu_{0i} e^{\tilde{\alpha}^* p'}. \qquad (2.1)$$

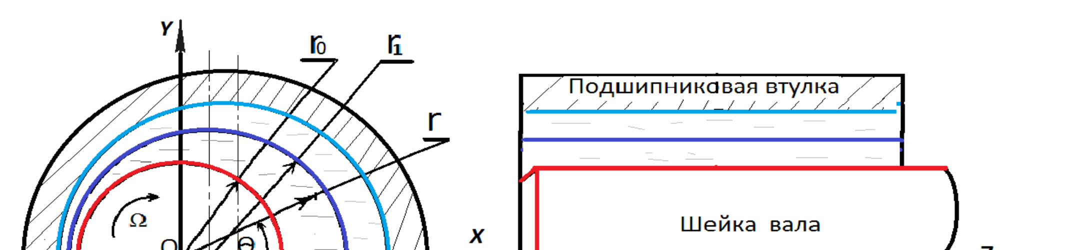
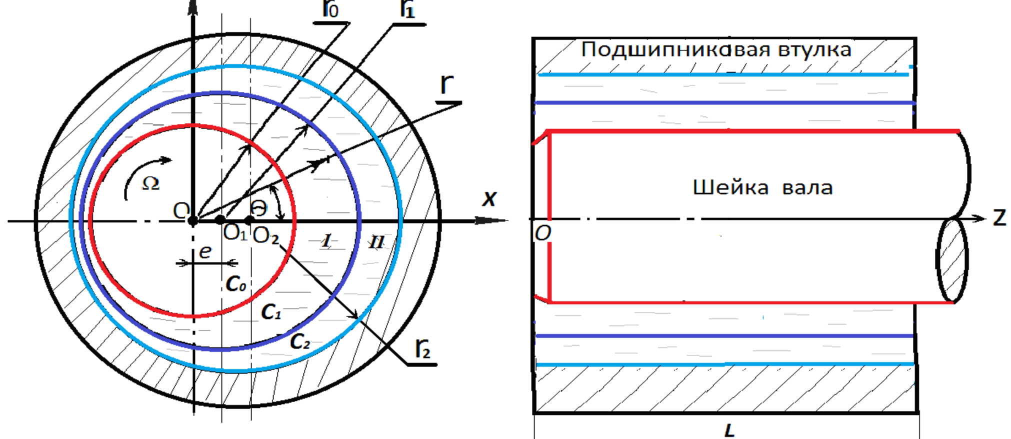



Рис. 2.1. Расчетная схема

В цилиндрической системе координат (r', θ, z') с началом в центре вала уравнения контуров вала, границы раздела слоев и адаптированного контура опорной поверхности запишутся в виде:

$$c_0 : r' = r_0; \quad c_1 : r' = r_0 + \delta\alpha + \alpha e \cos\theta - \alpha A \sin\omega\theta;$$
$$c_2 : r' = r_2 + e\cos\theta - A\sin\omega\theta, \quad \text{где} \quad \alpha \in [0,1],\ \delta = r_2 - r_0. \qquad (2.2)$$

Исходные уравнения и граничные условия. Движение смазочной среды описывается системой уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости для приближения типа «тонкий слой» и уравнениями неразрывности

$$\frac{\partial^2 \upsilon_i}{\partial r^2} = \Lambda_i e^{-\tilde{\alpha} p} \frac{\partial p}{\partial \theta}, \quad \frac{\partial^2 w_i}{\partial r^2} = \Lambda_i e^{-\tilde{\alpha} p} \frac{\partial p}{\partial z}, \quad \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial \upsilon_i}{\partial \theta} + \frac{\partial w_i}{\partial z} = 0 \ \ (i = 1, 2), \qquad (2.3)$$

где размерные величины $r', z', u_i', \upsilon_i', p_i', \mu_i'$, описывающие распределение скоростей и давлений в смазочном слое, связаны с соответствующими стандартизированными величинами $r, z, u_i, \upsilon_i, p_i, \mu_i$ соотношениями

$$r' = r_0 + \delta r,\ \ z' = r_0 z,\ \ w_i' = \Omega r_0 w_i,\ \ \upsilon_i' = \Omega r_0 \upsilon_i,\ \ u_i' = \Omega\delta u_i,\ \ p' = p_g p,\quad \mu'_i = \mu_{0i}\mu_i. \tag{2.4}$$

Здесь $u_i,\ \upsilon_i',\ w_i'$ — компоненты вектора скорости смазочных сред; p' — гидродинамическое давление в смазочных слоях; μ_i — динамические коэффициенты вязкости в смазочных слоях; $\tilde{\alpha}$ — экспериментальная постоянная; $\Lambda_i = \dfrac{\delta^2 p_g}{\mu_0 \Omega r_0^2}$, p_g — характерное давление.

Граничные условия на поверхности вала и подшипника записываются в виде

$$u_1|_{r=0} = 0,\quad \upsilon_1|_{r=0} = 1,\quad p(0,z) = p(2\pi, z);\quad w_1|_{r=0} = 0,\quad p(0,0) = 1,\quad p(0,1) = \frac{p_k}{p_g},$$

$$u_2|_{r=h(\theta)} = 0,\quad \upsilon_2|_{r=h(\theta)},\quad w_2|_{r=h(\theta)} = 0. \tag{2.5}$$

На границе раздела слоев граничные условия записываются в виде:

$$u_1|_{r=\alpha h} = u_2|_{r=\alpha h},\quad \upsilon_1|_{r=\alpha h} = \upsilon_2|_{r=\alpha h},\quad w_1|_{r=\alpha h} = w_2|_{r=\alpha h},$$

$$\frac{\partial \upsilon_1}{\partial r}\Big|_{r=\alpha h} = \frac{\mu_2}{\mu_1}\frac{\partial \upsilon_2}{\partial r}\Big|_{r=\alpha h},\quad \frac{\partial w_1}{\partial r}\Big|_{r=\alpha h} = \frac{\mu_2}{\mu_1}\frac{\partial w_2}{\partial r},\quad \frac{u_i}{\upsilon_i}\Big|_{r=\alpha h} = \alpha h'(\theta),$$

$$h(\theta) = 1 + \eta\cos\theta - \eta_1 \sin\omega\theta,\quad \eta = e/\delta,\quad \eta_1 = A/\delta. \tag{2.6}$$

Граничные условия (2.5) означают прилипание смазки к поверхности вала и подшипника, периодичность гидродинамического давления, а также то, что при $\theta = 0$ давление задано в двух сечениях.

Условия (2.6) означают равенство скоростей, касательных и нормальных напряжений на границе раздела слоев, а также условие существования слоистого течения смазки, т. е. требуется, чтобы скорость точек границы раздела слоев в каждой точке была направлена по касательной к контуру раздела слоев.

Точное автомодельное решение. Точное автомодельное решение системы уравнений (2.3), удовлетворяющее граничным условиям (2.5) и (2.6), ищется в виде

$$u_i = -\frac{\partial \psi_i}{\partial \theta} + U_i(r,\theta),\quad \upsilon_i = \frac{\partial \psi_i}{\partial r} + V(r,\theta),\quad \psi_i = \tilde{\psi}_i(\xi),\quad w_i = \tilde{w}_i(\xi,\theta),$$

$$U_i(r,\theta) = -\tilde{u}_i(\xi)h'(\theta),\quad V_i(r,\theta) = \tilde{\upsilon}_i(\xi),\quad \xi = \frac{r}{h(\theta)},$$

$$\Lambda_1 e^{-\tilde{\alpha}p} = (-\tilde{\alpha})\int_0^\theta \left(\frac{\tilde{c}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{c}_2}{h^3(\theta)}\right)d\theta + (-\tilde{\alpha})a_1 z,\quad \Lambda_2 e^{-\tilde{\alpha}p} = (-\tilde{\alpha})\int_0^\theta \left(\frac{\tilde{\tilde{c}}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{\tilde{c}}_2}{h^3(\theta)}\right)d\theta + (-\tilde{\alpha})a_2 z,$$

$$a_1 = a_2\frac{\mu_2}{\mu_1},\quad a_2 = \frac{r_0}{l p_g}(p_k - 1),\quad a_1 = \frac{\mu_{02}}{\mu_{01}}a_2. \tag{2.7}$$

Подставляя (2.7) в (2.3), (2.5) и (2.6), придем к следующей системе дифференциальных уравнений и граничных условий к ним:

$$\tilde{\psi}_1''' = \tilde{c}_2,\quad \tilde{\upsilon}_1'' = \tilde{c}_1,\quad \tilde{u}_1' + \xi\tilde{\upsilon}_1' = 0,\quad \tilde{\psi}_2''' = \tilde{\tilde{c}}_2,\quad \tilde{\tilde{\upsilon}}_2'' = \tilde{\tilde{c}}_1'',$$

$$\frac{\partial^2 w_1}{\partial \xi^2} = a_1 h^2(\theta),\quad \frac{\partial^2 w_2}{\partial \xi^2} = a_2 h^2(\theta),\quad \tilde{u}_2' + \xi\upsilon_2' = 0; \tag{2.8}$$

$$\tilde{\psi}_1'(0) = 0;\quad \tilde{u}_1(0) = 0,\quad \tilde{\upsilon}_1(0) = 1,\quad \tilde{w}_1(0) = 0,\quad \tilde{\psi}_2'(1) = 0,$$

$$\tilde{u}_2(1) = 0,\quad \tilde{\upsilon}_2(1) = 0,\quad w_2(1) = 0,\quad \tilde{\upsilon}_1(\alpha) = \tilde{\upsilon}_2(\alpha),\quad \tilde{u}_1(\alpha) = \tilde{u}_2(\alpha),$$

$$\tilde{\upsilon}_1'(\alpha) = \frac{\mu_2}{\mu_1}\tilde{\upsilon}_2'(\alpha),\ \ \tilde{\psi}_1''(\alpha) = \frac{\mu_2}{\mu_1}\tilde{\psi}_2''(\alpha),\quad \tilde{c}_1 = \frac{\mu_2}{\mu_1}\tilde{\tilde{c}}_1,\quad \tilde{c}_2 = \frac{\mu_2}{\mu_1}\tilde{\tilde{c}}_2,\quad a_1 = \frac{\mu_{02}}{\mu_{01}}a_2,$$

$$\tilde{w}_1(\alpha,\theta) = w_2(\alpha,\theta),\quad \frac{\partial \tilde{w}_1}{\partial \xi}\Big|_{\xi=\alpha} = \frac{\mu_2}{\mu_1}\frac{\partial \tilde{w}_1}{\partial \xi}\Big|_{\xi=\alpha},\quad \int_0^\alpha \tilde{\upsilon}_1(\xi) + \int_\alpha^1 \tilde{\upsilon}_2(\xi)d\xi = 0. \tag{2.9}$$

Учитывая, что разделение смазочного материала на слои происходит вблизи неподвижной твердой поверхности, т.е. при значениях α, близких к единице, условие раздельного течения смазки $(\tilde{u}_i(\alpha)/\tilde{\upsilon}_i(\alpha)) = \alpha h'(\theta)$ в принятом нами приближении удовлетворяется. На самом деле из граничного условия

$$\tilde{u}_2(\alpha)+\alpha\tilde{\upsilon}_2(\alpha)+\int_{\alpha}^{1}\tilde{\upsilon}_2(\xi)d\xi=0 \tag{2.10}$$

следует

$$\tilde{\upsilon}_2(\alpha)\left[\frac{\tilde{u}_2(\alpha)}{\tilde{\upsilon}_2(\alpha)}+\alpha+\int_{\alpha}^{1}\frac{\tilde{\upsilon}_2(\xi)d\xi}{\tilde{\upsilon}_2(\alpha)}\right]=0. \tag{2.11}$$

Используя теорему о среднем значении, будем иметь

$$\tilde{\upsilon}_2(\alpha)\left[\frac{\tilde{u}_2(\alpha)}{\tilde{\upsilon}_2(\alpha)}+\alpha+\frac{\tilde{\upsilon}_2(\alpha^*)}{\tilde{\upsilon}_2(\alpha)}(1-\alpha)\right]=0,\quad \alpha^*\in(\alpha,1). \tag{2.12}$$

Так как $\tilde{\upsilon}_2(\alpha^*)<\tilde{\upsilon}_2(\alpha),\quad (1-\alpha)<<1,$ следовательно, с точностью до членов $0\left(\frac{\tilde{\upsilon}_2(\alpha^*)}{\tilde{\upsilon}_2(\alpha)}(1-\alpha)\right),$ будем иметь $\int_0^{\alpha}\tilde{\upsilon}_1(\xi)d\xi\approx 0,\quad \int_{\alpha}^{1}\tilde{\upsilon}_2(\xi)d\xi\approx 0.$

Решение задачи (2.8)–(2.9) находится непосредственным интегрированием. В результате будем иметь

$$\tilde{\psi}_1'=\tilde{c}_2\frac{\xi^2}{2}+c_2\xi+c_3,\quad \tilde{\upsilon}_1=\tilde{c}_1\frac{\xi^2}{2}+c_6\xi+c_7,\quad \tilde{w}_1=a_1h^2\frac{\xi^2}{2}+d_1\xi+d_2,$$

$$\tilde{\psi}_2'=\tilde{\tilde{c}}_2\frac{\xi^2}{2}+c_4\xi+c_5,\quad \tilde{\upsilon}_2=\tilde{\tilde{c}}_1\frac{\xi^2}{2}+c_8\xi+c_9,\quad \tilde{w}_2=a_2h^2\frac{\xi^2}{2}+d_3\xi+d_4,$$

$$\tilde{u}_1=-\tilde{c}_1\frac{\xi^3}{3}-c_6\frac{\xi^2}{2}+c_{10},\quad \tilde{u}_2=-\tilde{\tilde{c}}_1\frac{\xi^3}{3}-c_8\frac{\xi^2}{2}+c_{11},$$

$$p_1=\tilde{c}_1J_2(\theta)+\tilde{c}_2J_3(\theta)+a_1z+b_1,\quad p_2=\tilde{\tilde{c}}_1J_2(\theta)+\tilde{\tilde{c}}_2J_3(\theta)+a_2z+b_2,$$

$$\Lambda_1e^{-\alpha p}=\Lambda_1e^{-\alpha}-\tilde{\alpha}[J_2(\theta)\tilde{c}_1+J_3(\theta)\tilde{c}_2]-\tilde{\alpha}a_1z,$$

$$\Lambda_2e^{-\alpha p}=\Lambda_2e^{-\alpha}-\tilde{\alpha}[J_2(\theta)\tilde{\tilde{c}}_1+J_3(\theta)\tilde{\tilde{c}}_2]-\tilde{\alpha}a_2z,$$

$$J_k(\theta)=\int_0^{\theta}\frac{d\theta}{(1+\eta\cos\theta-\eta_1\sin\omega\theta)^k}. \tag{2.13}$$

Для определения постоянных $c_i(i=2,...,11),\quad d_j(j=1,2,3,4),\quad \tilde{c}_1,\tilde{c}_2,\tilde{\tilde{c}}_1,\tilde{\tilde{c}}_2$ решим следующую алгебраическую систему из 18 уравнений с 18 неизвестными:

$$c_7=1,\quad c_{10}=0,\quad c_3=0,\quad -\tilde{\tilde{c}}_1\frac{1}{3}-c_8\frac{1}{2}+c_{11}=0,\quad \tilde{\tilde{c}}_1\frac{1}{2}+c_8+c_9=0,$$

$$\tilde{c}_2\frac{\alpha^2}{2}+c_2\alpha+c_3-\tilde{\tilde{c}}_2\frac{\alpha^2}{2}-c_4\alpha-c_5=0;\quad \tilde{\tilde{c}}_2\frac{1}{2}+c_4+c_5=0,$$

$$\tilde{c}_1\frac{\alpha^2}{2}+c_6\alpha+c_7-\tilde{\tilde{c}}_1\frac{\alpha^2}{2}-c_8\alpha-c_9=0,\quad \tilde{c}_1=k\tilde{\tilde{c}}_1,\quad \tilde{c}_2=k\tilde{\tilde{c}}_2,\quad \tilde{\tilde{c}}_2=-\frac{\tilde{\tilde{c}}_1J_2(2\pi)}{J_3(2\pi)},$$

$$\tilde{c}_1\frac{\alpha^3}{6}+c_6\frac{\alpha^2}{2}+c_7\alpha-\tilde{\tilde{c}}_1\frac{\alpha^3}{6}-c_8\frac{\alpha^2}{2}-c_9\alpha+\tilde{\tilde{c}}_1\frac{1}{6}+c_8\frac{1}{2}+c_9=0,$$

$$\tilde{c}_1\alpha+c_6=k(\tilde{\tilde{c}}_1\alpha+c_8),\quad \tilde{c}_2\alpha+c_2=k(\tilde{\tilde{c}}_2\alpha+c_4),$$

$$d_2=0,\quad a_2h^2\frac{1}{2}+d_3+d_4=0,\quad a_1h^2\frac{\alpha^2}{2}+d_1\alpha=a_2h^2\frac{\alpha^2}{2}+d_3\alpha+d_4,$$

$$a_1h^2\alpha+d_1=\frac{\mu_2}{\mu_1}(a_2h^2\alpha+d_3),\quad k=\mu_2/\mu_1. \tag{2.14}$$

Решение системы (2.14) сводится к решению следующих двух матричных уравнений:

$$M\cdot\vec{x}=\vec{b}, \tag{2.15}$$

где $\vec{x} = \left\{\tilde{\tilde{c}}_1;\, c_4;\, c_5;\, c_8;\, c_9\right\}$, $\vec{b} = \{0;\, 0; -6\alpha;\, 0;\, -2\}$,

$$M = \begin{bmatrix} -\dfrac{J_2(2\pi)}{J_3(2\pi)} & 2 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 2 & 2 \\ k\alpha^3 - \alpha^3 + 1 & 0 & 0 & 3k\alpha^2 - 3a^2 + 3 & 6 - 6\alpha \\ (1-k)\alpha^2 \dfrac{J_2(2\pi)}{J_3(2\pi)} & 2\alpha(k-1) & -2 & 0 & 0 \\ \alpha^2(k-1) & 0 & 0 & 2\alpha(k-1) & -2 \end{bmatrix}$$

$$N \cdot \vec{y} = \vec{m}, \tag{2.16}$$

где $\vec{y} = \{d_1;\, d_3;\, d_4\}$, $\vec{m} = \left\{\dfrac{h^2\alpha^2}{2}(a_2 - a_1);\; h^2\alpha(ka_2 - a_1);\, -a_2\dfrac{h^2}{2}\right\}$,

$$N = \begin{vmatrix} \alpha & -\alpha & -1 \\ 1 & -k & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{vmatrix}. \tag{2.17}$$

Решая матричные уравнения (2.15) и (2.16), с учетом (2.14), будем иметь

$$\tilde{\tilde{c}}_1 = \frac{6 + 6\kappa\alpha^2 - 6\alpha^2}{\Delta}, \quad c_4 = \frac{\dfrac{J_2(2\pi)}{J_3(2\pi)}(3 - 6\alpha^2 - 3\alpha^4 - \alpha\beta + 3k^2\alpha^4 - 6k\alpha^4)}{(\alpha k - \alpha + 1)\Delta},$$

$$c_5 = \frac{-\dfrac{J_2(2\pi)}{J_3(2\pi)}\alpha(3\alpha^3 - 3\alpha^2 - 3\alpha + 3 + 6k\alpha^2 - 3k + 3\alpha^3k^2 - 3\alpha^2k^2 - 6k\alpha^3 + 3\alpha k)}{(\alpha k - \alpha + 1)\Delta},$$

$$c_8 = \frac{4 - 4\alpha^3 + 4k\alpha^3}{\Delta}, \quad c_9 = \frac{-4\alpha^3 + 3\alpha^2 + 4k\alpha^3 - 3k\alpha^2 + 1}{\Delta}, \quad c_2 = kc_4, \quad c_6 = kc_8, \tag{2.18}$$

$$\Delta = -4\alpha^3 + 1 + \alpha^4 - 6k\alpha^2 + 4k\alpha^3 + k^2\alpha^4 + 4k\alpha - 2k\alpha^4 - 4\alpha + 6\alpha^2,$$

$$\frac{J_2(2\pi)}{J_3(2\pi)} = 1 + \frac{\eta_1}{2\pi\omega}(\cos 2\pi\omega - 1), \quad \tilde{c}_2 = -\tilde{c}_1\left(1 + \frac{\eta_1}{2\pi\omega}(\cos 2\pi\omega - 1)\right),$$

$$\tilde{c}_1 = k\tilde{\tilde{c}}_1, \quad \tilde{\tilde{c}}_2 = -\tilde{\tilde{c}}_1\frac{J_2(2\pi)}{J_3(2\pi)}, \quad d_2 = 0, \quad d_3 = -d_4 - a_2\frac{h^2}{2},$$

$$d_4 = \frac{\dfrac{1}{2}\dfrac{k^2\alpha}{2}\left[ka_2\alpha - a_1\alpha + a_2(1-\alpha)\right]}{k\alpha - \alpha + 1}, \quad d_1 = ka_2h^2\alpha + d_3k - a_1h^2\alpha.$$

Определение основных рабочих характеристик подшипника. Для гидродинамического давления в принятом нами приближении приходим к следующему уравнению:

$$\tilde{\alpha}p^2 - 2p + 2 - \tilde{\alpha} - \frac{2\tilde{\alpha}}{\Lambda_1}\left[\tilde{c}_1J_2(\theta) + \tilde{c}_2J_3(\theta)\right] - \frac{2\alpha a_1 z}{\Lambda_1} = 0.$$

Решая это уравнение, с точностью до членов $0(\eta, \tilde{\alpha})$, $0\left(\tilde{\alpha}\dfrac{r_0}{l}\right)$, будем иметь

$$p = 1 + \frac{1}{\Lambda_1}\left[\tilde{c}_1J_2(\theta) + \tilde{c}_2J_3(\theta)\right]\left(1 + \frac{\tilde{\alpha}}{2}\right) + \frac{a_1z}{\Lambda_1}\left(1 + \frac{\tilde{\alpha}}{2}\right). \tag{2.19}$$

Приведем гидродинамические силы, возникающие в смазочных слоях и воздействующие на вал, к центру вала *O*. Для ортогональных проекций безразмерного главного вектора этих сил, действующих на единицу длины вала, главного момента и момента сопротивления осевому движению, получим выражения

$$\tilde{R}_y = \frac{R_y\delta^2}{\mu_1\Omega r_0^2}\int_0^{2\pi}\tilde{p}_1\sin\theta d\theta,\ \ R_x = -\frac{\mu_1\Omega r_0^2}{\delta^2}\int_0^{2\pi}\tilde{p}_1\cos\theta d\theta,$$

$$\tilde{L}_{\text{тр}} = \frac{L_{\text{тр}}\delta}{\mu_1\Omega r_0^3}\int_0^{2\pi}\left(\frac{\tilde{\psi}_1''(\xi)}{h^2(\theta)}+\frac{\tilde{\upsilon}_1'(\xi)}{h(\theta)}\right)\Big|_{\xi=0}\, d\theta,$$

$$\tilde{L}_{\text{тр.ос.}} = \frac{L_{\text{тр.ос.}}\delta}{\mu_1 r_0^3\Omega}\int_0^{2\pi}\frac{1}{h(\theta)}\frac{\partial\tilde{w}_1}{\partial\xi}\Big|_{\xi=0}\, d\theta.$$

Выражения для расходов смазочной жидкости в окружном и в осевом направлениях, записанные в нормализованной форме, будут иметь следующий вид:

$$\tilde{Q}_1 = \frac{Q_1}{\Omega r_0\delta}\left[\int_0^{2\pi}\tilde{\psi}_1'(\xi)d\xi+\int_\alpha^1\tilde{\psi}_2'(\xi)d\xi\right], \quad (2.20)$$

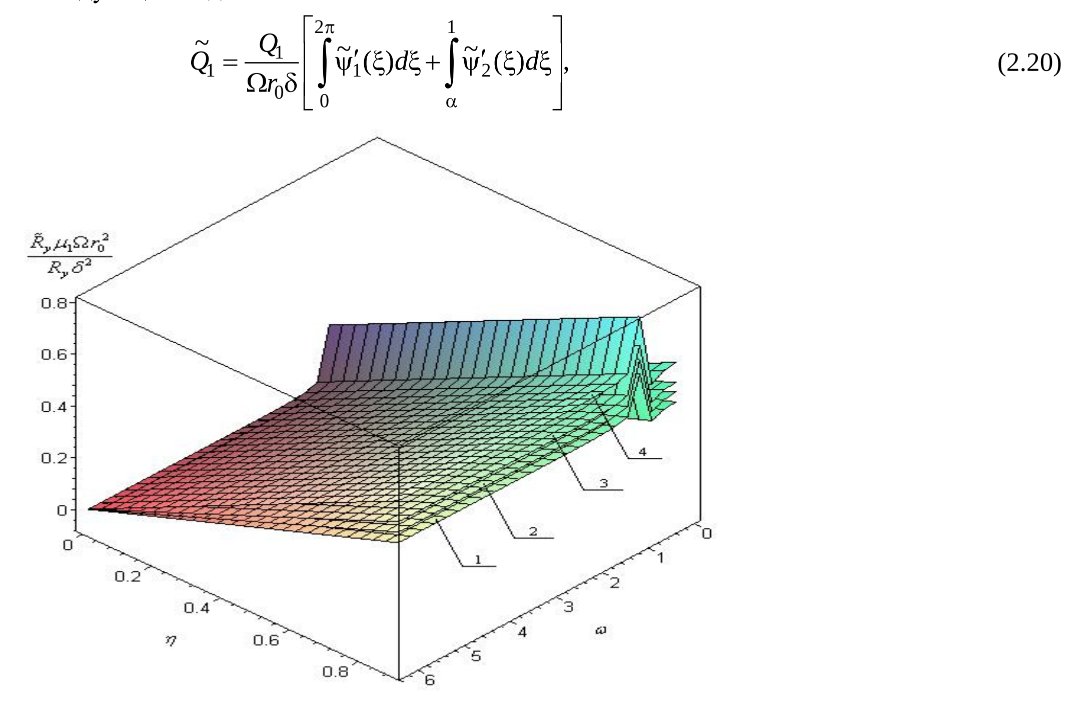


Рис. 2.2. Зависимость величины безразмерной несущей способности $\frac{\tilde{R}_y\mu_1\Omega r_0^2}{R_y\delta^2}$ от параметра расслоения смазочного материала η и параметра адаптированного опорного профиля ω при значениях вязкостных параметров: *1* – α = 0,1, $k_2/k_1 = 1$; *2* – α = 0,3, $k_2/k_1 = 1$; *3* – α = 0,5, $k_2/k_1 = 1,2$; *4* – α = 0,9, $k_2/k_1 = 1,3$

Проведение качественного анализа полученных аналитических выражений (2.20) для основных эксплуатационных характеристик узла трения позволяет сделать следующие выводы:

– компонента $\tilde{R}_y$ безразмерной поддерживающей силы существенно зависит от вязкостного параметра α и вязкостных отношений k_2/k_1;

– в рамках принятых предположений максимум несущей способности достигается при значении параметра опорного профиля $\omega = \frac{1}{2}$;

– учет зависимости вязкости от давления приводит к повышению расчетной несущей способности.

– в рамках принятых предположений, с увеличением значений вязкостного параметра α, сила сопротивления для осевого движения смазочного материала увеличивается.

Рассмотрев расчетные модели радиальных подшипников можно сделать следующие выводы:

- анализ полученных расчетных моделей радиальных подшипников с круговым опорным профилем, работающих на вязком несжимаемом смазочном материале при его двухслойной стратификации, позволил установить, что как обычные подшипники, так и подшипники с пористым покрытием на шейке вала имеют зависимость несущей способности от параметра вязкости смазочного материала α, вязкостного соотношения его стратифицированных слоев k_2

и параметра α, разделяющего слои. Причем с ростом этих параметров величина несущей способности подшипника увеличивается, а при значении α = 0,2 имеет максимум;

- расчетные модели конечных и бесконечноразмерных радиальных подшипников, с адаптированным к условиям трения опорным профилем и двухслойным стратифицированным вязким смазочным материалом при зависимости его вязкости от гидродинамического давления, показывают при анализе, что несущая способность подшипников увеличивается с ростом вязкостного параметра α, параметра η и параметра опорного профиля ω, при значении которого ω = 0,5 несущая способность имеет максимум;

- Теоретические исследования модели радиального подшипника, смазываемого материалом с двумя стратифицированными слоями, один из которых является вязким, с зависимостью вязкости от гидродинамического давления, а другой обладает вязкопластичностью, позволили установить, что несущая способность подшипника растет с увеличением параметра вязкости α, параметра стратифицированных слоев α (при α = 0,2 имеет место максимум) и параметра пластичности $\tilde{A}$.

Библиографический список

1. Дерягин, Б. Н. К теории граничного трения / Б. Н. Дерягин. — Москва : Изд. АН СССР, 1957. — 234 с.

2. Ахматов, А. С. Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. — Москва : Физматгиз, 1963. — 472 с.

3. Аэро, Э. Л. Микромеханика межконтактных структурированных слоев жидкости / Э. Л. Аэро, Н. М. Бессонов // Итоги науки и техники. Серия «Механика жидкости и газа». — 1989. — № 23. — С. 116–236.

4. Ахвердиев, К. С. Математическая модель стратифицированного течения двухслойной смазочной композиции в радиальном подшипнике с повышенной несущей способностью с учетом теплообмена / К. С. Ахвердиев [и др.] // Вестник Рост. гос. ун-та путей сообщ. — 2011. — № 1. — С. 160–165.

5. Ахвердиев, К. С. Стратифицированное течение трехслойной смазки в зазоре радиального подшипника, обладающего повышенной несущей способностью и демпфирующими свойствами / К. С. Ахвердиев [и др.] // Вестник Рост. гос. ун-та путей сообщ. — 2010. — № 4(40). — С. 115–120.

6. Ахвердиев, К. С. Стратифицированное течение двухслойной смазки в зазоре упорного подшипника, обладающего повышенной несущей способностью / К. С. Ахвердиев [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2010. — Т. 10. — № 2(45). — С. 217–222.

7. Ахвердиев, К. С. Стратифицированное течение двухслойной смазки в зазоре сложнонагруженного радиального подшипника конечной длины, обладающего повышенной несущей способностью / К. С. Ахвердиев, Е. Е. Александрова, М. А. Мукутадзе // Вестник Рост. гос. ун-та путей сообщ. — 2010. — № 1. — С. 132–137.

8. Ахвердиев, К. С. Стратифицированное течение двухслойной смазки в зазоре упорного подшипника, обладающего повышенной несущей способностью и демпфирующими свойства / К. С. Ахвердиев, Е. Е. Александрова, М. А. Мукутадзе // Проблемы синергетики в трибологии, трибоэлектрохимии, материаловедении и мехатронике : материалы VIII междунар. науч.-практ. конф. — Новочеркасск, 2009. — С. 14–23.

9. Ахвердиев, К. С. Стратифицированное течение двухслойной смазки в зазоре радиального подшипника, обладающего повышенной несущей способностью и демпфирующими свойствами / К. С. Ахвердиев [и др.] // Вестник Рост. гос. ун-та путей сообщ. — 2009. – № 4. — С. 133–139.

10. Okrent, E. H. The Effect of Lubricant Viscosity and Composition on Engine / E. H. Okrent // Friction and Bearing Wear. Part II. ASLE Trans. Vol. 4. 1961. — P. 257–262.

11. Prakash, J. Lubrication Theory for Micropolar Fluids and Its Application to a Journal Bearing / J. Prakash, Sinha, P. // Int. J. Eng. Sci., Vol. 13, 1975. — P. 217.

12. Tanner, R. I. Non-Newtonian Lubrication Theory and Its Application — to the Short Journal Bearing / R. I. Tanner //Aust. J. Appl. Sci., Vol. 14. 1963. — P. 29–36.

13. Tipei, N. Lubrication with micropolar liquids and its application to short bearings / N. Tipei // Trans. ASME. — 1979. — U.F. 101. — P. 356–363.

14. Wada Sanae. Hydrodynamic lubrication of journal bearing by pseudo-plastic lubricants. Part II, Theoretical studies / Wada Sanae, Hayashi Hirotsugu // Bulletin of JSME, 1971, 14, № 69. — P. 279–286.

15. Wada Sanae. Hydrodynamic lubrication of journal bearings by pseudo-plastic lubricants. Part I, Theoretical studies / Wada Sanae, Hayashi Hirotsugu // Bulletin of JSME, 1971, 14, № 69. — P. 268–278.

References

1. Deryagin, B. N. K teorii granichnogo treniya. [On the theory of boundary friction.] Moscow: Izd. AN SSSR, 1957, 234 p. (in Russian).

2. Akhmatov, A. S. Molekulyarnaya fizika granichnogo treniya. [Molecular Physics of boundary friction.] Moscow: Fizmatgiz, 1963, 472 p. (in Russian).

3. Aero, E. L., Bessonov, N. M. Mikromekhanika mezhkontaktnykh strukturirovannykh sloev zhidkosti. [Micromechanics of contact structured liquid layers.] Itogi nauki i tekhniki. Seriya «Mekhanika zhidkosti i gaza». 1989, no. 23, pp. 116–236 (in Russian).

4. Akhverdiyev, K. S., et al. Matematicheskaya model' stratifitsirovannogo techeniya dvukhsloynoy smazochnoy kompozitsii v radial'nom podshipnike s povyshennoy nesushchey sposobnost'yu s uchetom teploobmena. [A mathematical model of two-layer stratified flow of the lubricant composition in radial bearing with high load-bearing capacity with account for heat transfer.] Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya, 2011, no. 1, pp. 160–165 (in Russian).

5. Akhverdiyev, K. S., et al. Stratifitsirovannoe techenie trekhsloynoy smazki v zazore radial'nogo podshipnika, obladayushchego povyshennoy nesushchey sposobnost'yu i dempfiruyushchimi svoystvami. [Stratified flow of three-layer lubrication of the radial bearing gap with increased bearing capacity and damping characteristics.] Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya, 2010, no. 4(40), pp. 115–120 (in Russian).

6. Akhverdiyev, K. S., et al. Stratifitsirovannoe techenie dvukhsloynoy smazki v zazore upornogo podshipnika, obladayushchego povyshennoy nesushchey sposobnost'yu.[Stratified flow of two-layer lubrication in the clearance of thrust bearing with the increased bearing capacity.] Vestnik of DSTU, 2010, vol. 10, no. 2(45), pp. 217–222 (in Russian).

7. Akhverdiyev, K. S., Alexandrova, E. E., Mukutadze, M. A. Stratifitsirovannoe techenie dvukhsloynoy smazki v zazore slozhnonagruzhennogo radial'nogo podshipnika konechnoy dliny, obladayushchego povyshennoy nesushchey sposobnost'yu. [Stratified flow of two-layer lubricant in the complex-loaded finite-length radial bearing gap with increased bearing capacity.] Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya, 2010, no. 1, pp. 132–137 (in Russian).

8. Akhverdiyev, K. S., Alexandrova, E. E., Mukutadze, M. A. Stratifitsirovannoe techenie dvukhsloynoy smazki v zazore slozhnonagruzhennogo radial'nogo podshipnika konechnoy dliny, obladayushchego povyshennoy nesushchey sposobnost'yu. [Stratified flow of two-layer lubrication in the thrust bearing gap with increased bearing capacity and damping properties.] Problemy sinergetiki v tribologii, triboelektrokhimii, materialovedenii i mekhatronike : materialy VIII mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Problems of synergetics in tribology, triboelectrochemistry, material science, and mechatronics: Proc. VIII Int. Sci.-Pract. Conf.] Novocherkassk, 2009, pp. 14–23 (in Russian).

9. Akhverdiyev, K. S., et al. Stratifitsirovannoe techenie dvukhsloynoy smazki v zazore radial'nogo podshipnika, obladayushchego povyshennoy nesushchey sposobnost'yu i dempfiruyushchimi svoystvami. [Stratified flow of two-layer lubricant in the radial bearing gap with increased bearing capacity and damping characteristics.] Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya, 2009, no. 4, pp. 133–139 (in Russian).

10. Okrent, E. H. The Effect of Lubricant Viscosity and Composition on Engine. Friction and Bearing Wear. Part II. ASLE Trans. 1961, vol. 4, pp. 257–262.

11. Prakash, J., Sinha, P. Lubrication Theory for Micropolar Fluids and Its Application to a Journal Bearing. Int. J. Eng. Sci., 1975, vol. 13, iss. 3, p. 217.

12. Tanner, R. I. Non-Newtonian Lubrication Theory and Its Application — to the Short Journal Bearing. Aust. J. Appl. Sci., 1963, vol. 14, pp. 29–36.

13. Tipei, N. Lubrication with micropolar liquids and its application to short bearings. Trans. ASME. 1979, U.F. 101, pp. 356–363.

14. Wada Sanae, Hayashi Hirotsugu. Hydrodynamic lubrication of journal bearing by pseudo-plastic lubricants. Part II, Theoretical studies. Bulletin of JSME, 1971, 14, no. 69, pp. 279–286.

15. Wada Sanae, Hayashi Hirotsugu. Hydrodynamic lubrication of journal bearings by pseudo-plastic lubricants. Part I, Theoretical studies. Bulletin of JSME, 1971, 14, no. 69, pp. 268–278.

Поступила в редакцию 26.01.2015
Сдана в редакцию 26.01.2015
Запланирована в номер 28.01.2015

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621. 793. 79. 015 DOI 10.12737/10394

Повышение эксплуатационных свойств деталей при обработке динамическими методами поверхностного пластического деформирования*

А. С. Шведова**
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Improvement of part service properties under surface plastic deformation treatment by dynamic methods ***

A. S. Shvedova**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Цель работы заключается в повышении эффективности и надёжности обработки поверхностного слоя за счёт использования адекватных теоретических моделей на стадии технологического проектирования. Предложены зависимости для определения шероховатости поверхности и глубины упрочнённого слоя. Анализ технологических процессов динамических способов ППД показал, что несмотря на большое количество проведённых теоретических и экспериментальных исследований, прогнозирование остаточных напряжений в поверхностном слое является достаточно сложной задачей. Использование универсальной программной системы ANSYS, в основе которой лежит метод конечных элементов (МКЭ), позволяет достаточно точно рассчитать параметры напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя детали после обработки. По результатам компьютерного моделирования представлены графики распределения остаточных напряжений, установлена адекватность предложенных теоретических моделей. Результаты исследований могут быть использованы для прогнозирования качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей после обработки динамическими методами ППД на стадии технологического проектирования.

Ключевые слова: эксплуатационные свойства, качество поверхностного слоя, динамические методы поверхностного пластического деформирования

The process of improving the surface layer quality and service properties of the machine parts in response to the treatment of the surface plastic deformation (SPD) using the dynamic methods is studied. The aim of the work is to improve the efficiency and reliability of the surface layer processing through the use of the adequate theoretical models at the technological design stage. The study results of the effect of the dynamic pressure maintenance methods (PMM) on the part performance properties are analyzed. The dependencies for the determination of the surface roughness and the hardened layer depth are proposed. The flow analysis of the dynamic PMM has shown that despite a large number of the theoretical and experimental studies, the prediction of the residual stresses in the surface layer is quite a challenge. The application of the universal program system ANSYS which is based on the finite element method (FEM) allows to accurately calculate the stress-strain state parameters of the part surface layer after processing. According to the computer simulation results, the residual stress distribution graphs are presented, and the validity of the offered theoretical models is established. The research results can be used to predict the surface layer quality and the part service properties after processing by the dynamic PMM at the technological design stage.

Keywords: service properties, surface layer quality, dynamic methods of surface plastic deformation.

Введение. В современном машиностроительном производстве одной из основных проблем, решаемых при изготовлении деталей различного назначения, является улучшение качества, повышение надёжности и долговечности производимых изделий. Качество выпускаемых изделий напрямую зависит от эксплуатационных свойств деталей. На протяжении всего жизненного цикла происходит формирование поверхностного слоя, характеристики которого в значительной мере определяют эти свойства. Именно в поверхностном слое формируются основные эксплуатационные

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** e-mail: kazimirovas@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

свойства такие, как износостойкость, усталостная прочность и долговечность, коррозионная стойкость, сопротивление контактной усталости и др. [1]

Основная часть. Среди финишных способов обработки, повышающих долговечность детали на заключительных стадиях технологического процесса, в производстве широко используются методы упрочнения поверхностным пластическим деформированием. Сущность ППД заключается в том, что требуемые размеры деталей и качество поверхности достигаются не срезанием материала, а его пластическим формоизменением. Методы ППД просты в реализации, экономичны, производительны, обеспечивают формирование низкой шероховатости, заданной глубины и степени упрочнения, а также остаточных напряжений, мелкозернистой структуры и других показателей качества поверхностного слоя обработанных деталей. В процессе ППД поверхностный слой претерпевает качественные изменения — одновременно с повышением твёрдости и прочности поверхности детали происходит сглаживание микронеровностей, образуются остаточные напряжения сжатия, которые оказывают влияние на циклическую прочность деталей [2, 3].

Используемые на финишных этапах обработки методы ППД можно классифицировать на статические, динамические и комбинированные. Достаточно большое распространение получили динамические методы ППД — методы, характеризующиеся ударным дискретным приложением деформационного усилия (ударная обработка элементами с направленной траекторией, ударная обработка свободными элементами, ударная обработка полужёсткими элементами, чеканка). Основным достоинством данных способов ППД является возможность обработки фасонных деталей, обеспечение требуемой точности, качества поверхностного слоя при высокой производительности [4].

Многолетний опыт исследований, проводимых кафедрой «Технология машиностроения», направлен на изучение таких динамических методов ППД как центробежно-ротационная обработка (ЦРО), вибрационная отделочно-упрочняющая обработка (ВиОУО), виброударная отделочная обработка шарико-стержневым упрочнителем (ШСУ). Установлено, что данные методы обработки обеспечивают необходимую шероховатость поверхности, благоприятную картину сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое детали, упрочнённый поверхностный слой. В ходе проведённых теоретических и экспериментальных исследований получены обобщённые зависимости для расчёта среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости:

$$R_{a_{уст}} = 0{,}001 \cdot \sqrt{\frac{h_{\max} \cdot a \cdot b \cdot l_{ед}}{R^2}} \quad (1)$$

где h_{max} — максимальная глубина внедрения индентора;
a, b — полуоси эллипса контакта индентора с поверхностью детали;
$l_{ед}$ — единичная длина;
R — радиус индентора.

$$h_{\max} = 2 \cdot V_0 \cdot R \cdot \sin\alpha \cdot \sqrt{\frac{k_ш \cdot \rho_ш}{3 \cdot k_s \cdot c \cdot \sigma_s}} \quad (2)$$

где $k_ш$ — коэффициент, учитывающий влияние соседних инденторов при ЦРО;
V_0— скорость движения инденторов в момент соударения с поверхностью детали;
α — угол встречи шарика с поверхностью детали при ударе;
$\rho_ш$ — плотность материала шарика;
k_s— коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта;
c — коэффициент несущей способности контактной поверхности (c=1÷6 — для материала в нормальном состоянии; c=10 — при наличии наклёпа);
σ_s — предел текучести материала;

Определение глубины упрочнённого слоя, непосредственно влияющей на многие эксплуатационные свойства, при обработке динамическими методами ППД можно осуществить по формуле:

$$h_н = 3k\sqrt{\left(\frac{\pi}{2} \cdot (\operatorname{ctg}\alpha - f) \cdot h_{\max} + b\right) \cdot \sqrt{R^2 - (R - h_{\max})^2}} \quad (3)$$

где k — коэффициент, зависящий от степени наклёпа;
f — коэффициент трения индентора о поверхность детали.

Несмотря на большое количество теоретических и экспериментальных исследований, назначение режимов обработки, которые должны обеспечить как необходимую шероховатость и упрочнение поверхностного слоя, так и благоприятную картину остаточных напряжений вызывает затруднения. Несомненно, что в таких условиях больший

научный и практический интерес представляет возможность расчётного прогнозирования величины и характера распределения остаточных напряжений по толщине пластически деформированного слоя деталей.

Для анализа напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя при упрочнении различными динамическими методами ППД и при исследовании формирования остаточных напряжений успешно применяется компьютерное моделирование, в основе которого лежит метод конечных элементов (МКЭ). Одной из универсальных и широкоиспользуемых программ, реализующих МКЭ, является ANSYS. Универсальность ANSYS позволяет решать линейные и нелинейные стационарные и нестационарные пространственные задачи механики деформируемого твёрдого тела и механики конструкций, задачи механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики, а также механики связанных полей [5, 6].

В работе [7], на основе имеющихся теоретических и практических данных, исследовано напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя детали при обработке ШСУ. При компьютерном моделировании единичного и многократного взаимодействия стержней с поверхностью детали в ANSYS были заданы параметры: внедрение стержня на заданную глубину *h*, диаметр стержней, величина натяга, диаметр заточки стержней и свойства материала. Основные характеристики отпечатков при единичном взаимодействии с ШСУ определяются по зависимостям [8]:

Для диаметра пластического отпечатка

$$d = \left(\frac{D \cdot E_u}{0{,}1 \cdot H_D} \right)^{\frac{1}{4}} \qquad (4)$$

где D — диаметр индентора, E_u — энергия удара индентора; H_D — динамическая твёрдость материала.

Для глубины пластического отпечатка

$$h = \frac{d^2}{4D} \qquad (5)$$

Для энергии удара индентора:

$$E_u = \frac{E_y}{N} \eta \qquad (6)$$

где η — коэффициент полезного действия устройства, зависящий от потерь энергии, N — число стержней в насадке.

В ходе компьютерного моделирования однократного и многократного взаимодействия индентора с поверхностью детали получены зависимости распределения остаточных радиальных напряжений от технологических параметров, представленные на рис. 1. Из графиков видно, что напряжения в поверхностном слое являются сжимающими, величина напряжений находится в пределах 140÷180 МПа, максимальные напряжения формируются на глубине около 0,2 мм.

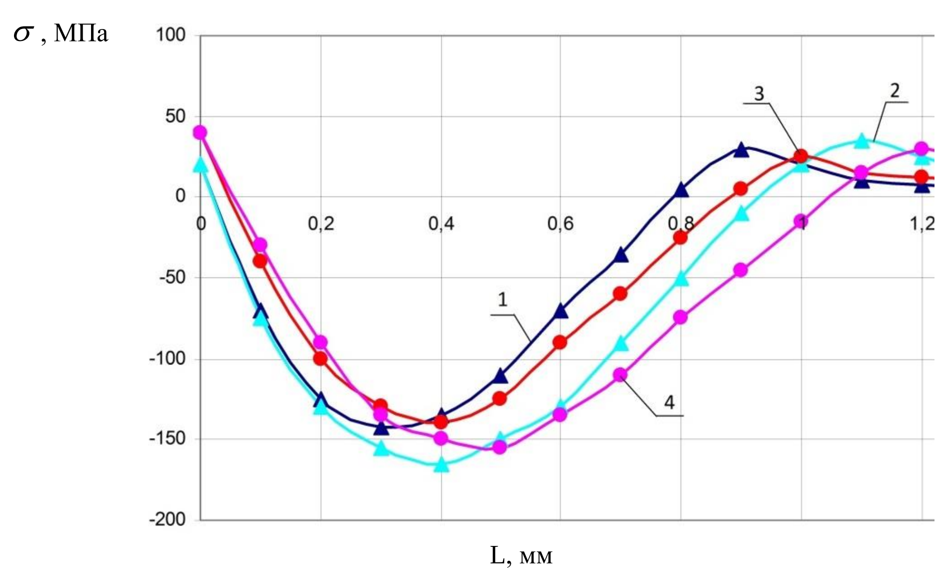


Рис. 1. Влияние величины натяга и радиуса заточки стержня на распределение остаточных радиальных напряжений (1 – R4, натяг 1,5; 2- R4, натяг 4,5; 3 – R8, натяг 1,5;4 – R8, натяг 4,5)

Методы исследований. Для более детального анализа распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали ANSYS позволяет получить эпюры полей напряжений (рис. 2). На эпюрах видно, что количество ударов незначительно влияет на глубину залегания остаточных напряжений, но способствует росту площади распространения напряжений.

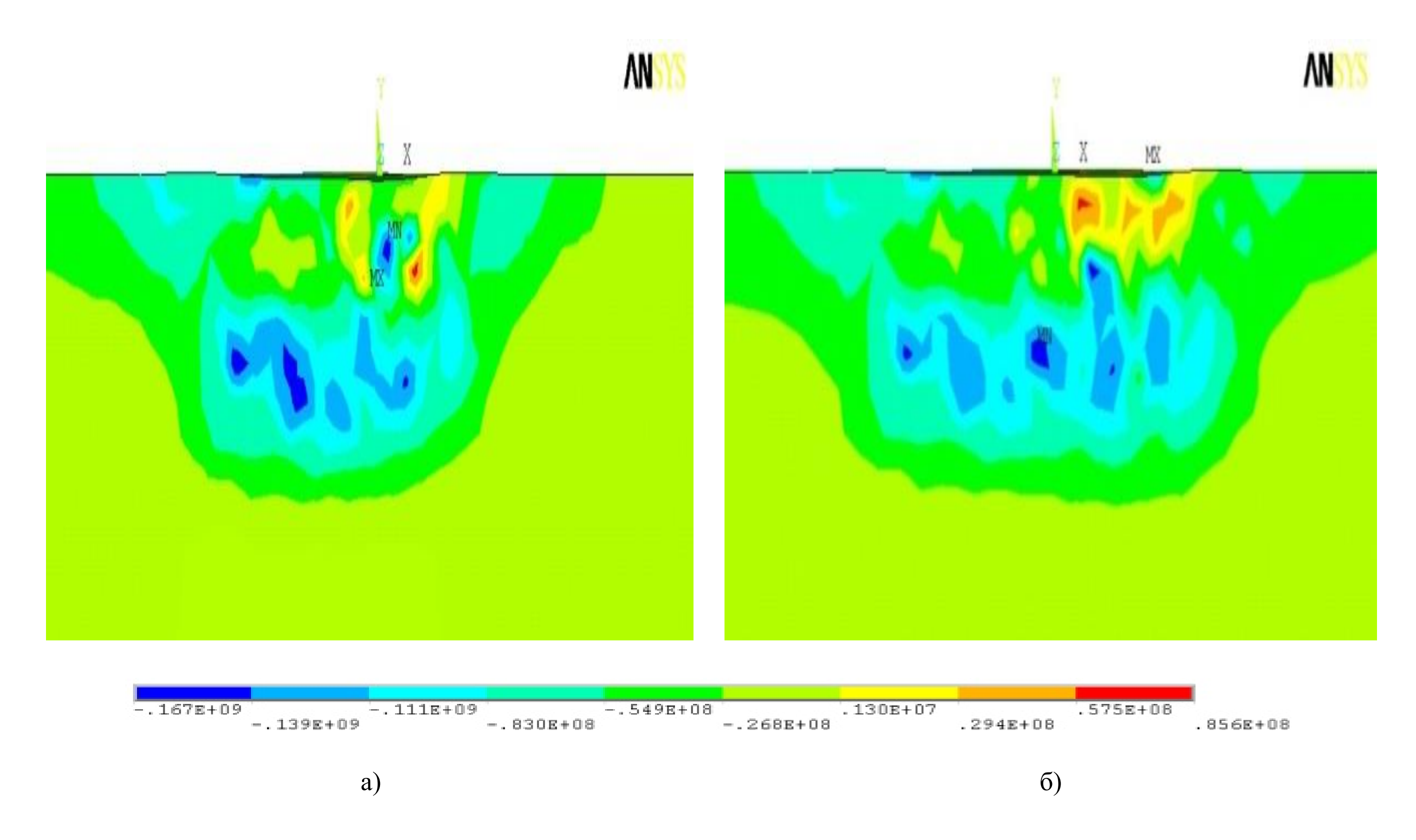


Рис. 2. Эпюры распределения остаточных напряжений после серии последовательных ударов:
а) после четырёх ударов б) после восьми ударов

Для проверки представленных зависимостей (1) и (3) был проведён ряд экспериментов.

Обработка образцов размером 200×100×20 мм осуществлялась вручную, с натягом 1,5±0,3 мм и 4,5±0,5 мм, радиус заточки стержней 4 и 8 мм. Материал образцов — алюминиевый сплав В95, широко применяющийся в авиационной промышленности, в которой накоплен опыт исследований остаточных напряжений у деталей из этого материала и отработаны соответствующие методики. Время обработки — 15–30 с. Образцы предварительно обрабатывались чистовым фрезерованием.

Определение остаточных напряжений осуществлялось на автоматизированном стенде контроля остаточных напряжений АСКОН-3-КАИ (в дальнейшем АСКОН) производства Казанского авиационного института имени А. Н. Туполева (рис. 3) [9]. АСКОН предназначен для контроля технологических остаточных напряжений (ОН) в образцах, вырезаемых из деталей после различных видов обработки. АСКОН относится к средствам определения ОН механическим методом, основной принцип которого заключается в том, что последовательное удаление поверхностных слоев с ОН эквивалентно приложению на вновь образованных поверхностях оставшейся части образца напряжений обратного знака. ОН по мере удаления поверхностных слоев образца определяется по известной совокупности деформаций его оставшейся части. При этом используются общие положения и формулы, приведённые в книгах А. В. Подзея и И. А. Биргера [10].

После обработки из образцов по специальной методике вырезались на фрезерном станке пластинки размером 80×10×2 мм.

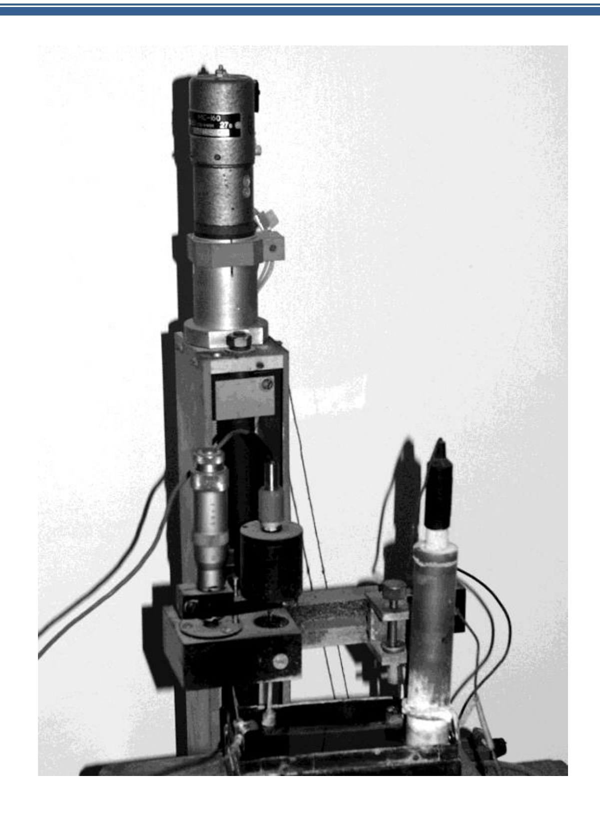


Рис. 3. Прибор для исследования внутренних напряжений АСКОН-3-КАИ

При определении ОН удаление напряженных слоев производилось электрохимическим методом.

В результате анализа и обработки экспериментальных данных по остаточным напряжениям, полученных после обработки деталей динамическими методами ППД, были получены результаты, представленные на рис. 4.

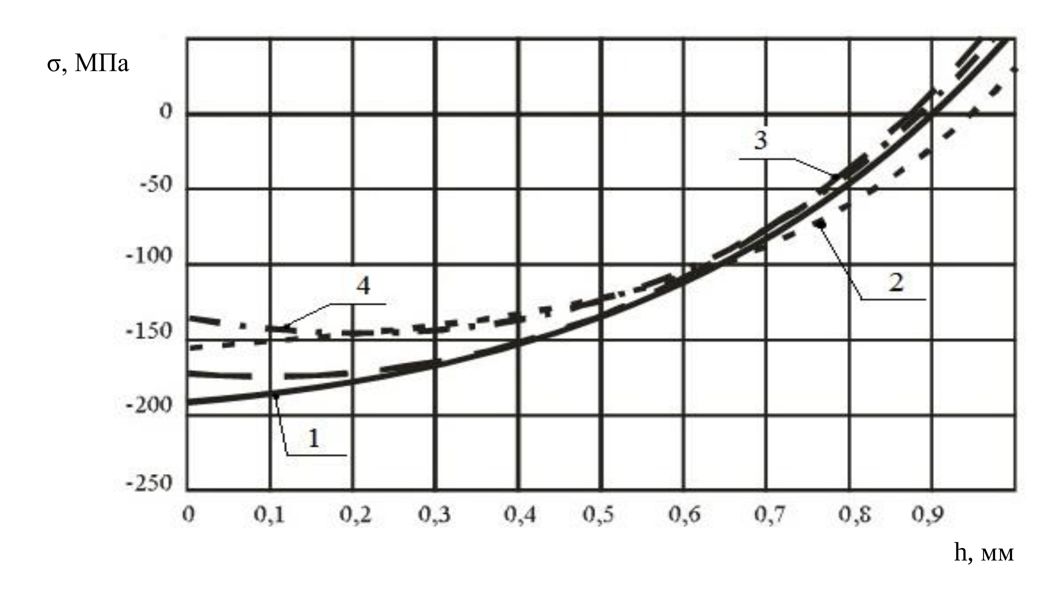


Рис. 4. Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое образцов, обработанных ШСУ (1 – R = 4 мм, натяг 4,5 мм; 2 – R = 4 мм, натяг 1,5 мм; 3 – R = 8 мм, натяг 4,5 мм; 4 – R = 8 мм, натяг 1,5 мм).

Из представленных зависимостей видно, что напряжения в поверхностном слое являются сжимающими, величина которых находится в пределах 130-200 МПа, глубина залегания напряжений находится в пределах 0,5 мм. В таблице 1 сопоставлены результаты экспериментальных данных и результаты, полученные при компьютерном моделировании взаимодействия индентора с поверхностью детали. На основании анализа этих данных можно сказать о том, что программа ANSYS позволяет достаточно точно рассчитать параметры глубины упрочненного слоя и величины остаточных напряжений.

Таблица 1

Сравнение экспериментальных и моделируемых значений глубины упрочненного слоя и остаточных напряжений

Остаточные напряжения (эксперимент), МПа	130÷200
Остаточные напряжения (компьютерное моделирование), МПа	140÷180
Глубина упрочнённого слоя (эксперимент), мм	0,5
Глубина упрочнённого слоя (компьютерное моделирование), мм	0,4

Заключение. На основании вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что применение динамических методов ППД на финишных этапах обработки позволяет получить необходимые характеристики поверхностного слоя. В свою очередь, использование детального анализа напряженно-деформированного состояния поверхности, проводимого при помощи конечно-элементного пакета ANSYS, позволяет выбрать рациональные значения технологических режимов обработки, которые обеспечивают требуемые характеристики поверхностного слоя, тем самым повышая эксплуатационные свойства деталей.

Библиографический список

1. Сулима, А. М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / В. А. Шулов , Ю. Д. Ягодкин — Москва : Машиностроение, 1988. — 240с.

2. Gillespie, Laroux K. Deburring and Edge Finishing Handbook. SME. ASME PRESS. New York, Michigan, 1999. — 404 p.

3. Лебедев, В. А. Классификация и физико-технологические аспекты динамических методов поверхностно-пластического деформирования / Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11, № 6. — С. 884–891.

4. Олейник, Н. В., Поверхностное динамическое упрочнение деталей машин / В. П. Кычин, А. Л. Луговской. — Киев : Техника, 1984. — 151с.

5. Чигаев, А. В. ANSYS для инженеров / А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. — Москва : Машиностроение, 2004. — 512 с.

6. Stolarski, T. Engineering analysis with ANSYS software / Y. Nakasone, S. Yoshimoto. — Oxford, UK: Elsevier, 2006. — 453 p.

7. Шведова, А. С. Методика прогнозирования повышения эксплуатационных свойств деталей динамическими методами ППД / А. С. Шведова, В. В. Остроух, М. Ю. Щерба // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. трудов Междунар. конф. «Интерагромаш - 2014». — Ростов-на-Дону, 2014. — С. 175–178.

8. Щерба, Л. М. Проектирование технологических процессов виброударной отделочной обработки шарико-стержневым упрочнителем с учетом снижения шума в рабочей зоне: дис. …канд. техн. наук / Л. М. Щерба. — Ростов-на-Дону, 2003. — 166 с.

9. Тищенко, Э. Э. Повышение эффективности отделочно-упрочняющей центробежно- ротационной обработки: дис. …канд. техн. наук / Э. Э. Тищенко — Ростов-на-Дону, 2004. — 151 с.

10. Биргер, И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. — Москва : Машгиз, 1963. — 232 с.

References

1. Sulima, A. M., Shulov, V. A., Yagodkin, Y. D. Poverkhnostnyy sloy i ekspluatatsionnye svoystva detaley mashin. [The surface layer and the service properties of machine parts.] Moscow: Mashinostroenie, 1988, 240 p. (in Russian).

2. Gillespie, LaRoux K. Deburring and Edge Finishing Handbook. SME. ASME PRESS. New York, Michigan, 1999, 404 p.

3. Lebedev, V. A. Klassifikatsiya i fiziko-tekhnologicheskie aspekty dinamicheskikh metodov poverkhnostno-plasticheskogo deformirovaniya. [Classification and physico-technological aspects of dynamic methods of surface-plastic deformation.] Vestnik of DSTU, 2011, vol. 11, no. 6, pp. 884–891 (in Russian).

4. Oleynik, N. V., Kychin, V. P., Lugovskoy, A. L. Poverkhnostnoe dinamicheskoe uprochnenie detaley mashin. [Dynamic surface hardening of machine parts.] Kiev: Tekhnika, 1984, 151p. (in Russian).

5. Chigayev, A. V., Kravchuk, A. S., Smalyuk, A. F. ANSYS dlya inzhenerov. [ANSYS for engineers.] Moscow: Mashinostroenie, 2004, 512 p. (in Russian).

6. Stolarski, T., Nakasone, Y., Yoshimoto, S. Engineering analysis with ANSYS software. Oxford, UK: Elsevier, 2006, 453 p.

7. Shvedova, A. S., Ostroukh, V. V., Shcherba, M. Y. Metodika prognozirovaniya povysheniya ekspluatatsionnykh svoystv detaley dinamicheskimi metodami PPD. [Forecasting technique to improve part service properties by dynamic PMM.] Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya: sb. trudov Mezhdunar. konf. «Interagromash - 2014». [State and prospects of the agricultural machinery development: Int.Conf. “Interagromash – 2014”, coll.of papers.] Rostov-on-Don, 2014, pp. 175–178 (in Russian).

8. Shcherba, L. M. Proektirovanie tekhnologicheskikh protsessov vibroudarnoy otdelochnoy obrabotki shariko-sterzhnevym uprochnitelem s uchetom snizheniya shuma v rabochey zone: dis. …kand. tekhn. nauk. [Design of vibro-impact finishing treatment by ball rod hardener considering noise abatement in the operating area: Cand.Sci. (Eng.) diss.] Rostov-on-Don, 2003, 166 p. (in Russian).

9. Tishchenko, E. E. Povyshenie effektivnosti otdelochno-uprochnyayushchey tsentrobezhno- rotatsionnoy obrabotki: dis. …kand. tekhn. nauk. [Efficiency improving of finishing and strengthening centrifugal-rotary processing: Cand.Sci. (Eng.) diss.] Rostov-on-Don, 2004, 151 p. (in Russian).

10. Birger, I. A. Ostatochnye napryazheniya. [Residual stresses.] Moscow: Mashgiz, 1963, 232 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 08.10.2014
Сдана в редакцию 10.10.2014
Запланирована в номер 28.01.2015

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT



УДК 519.725+519.876.5 DOI 10.12737/10395

Корректирующая способность декодера мягких решений троичных кодов Рида - Маллера второго порядка при большом числе ошибок*

Н. С. Могилевская**

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Correcting capacity of soft-decision decoder of ternary Reed – Muller second-order codes with a large number of errors ***

N. S. Mogilevskaya[1]**

[1]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Цель работы состоит в изучении корректирующей способности нового мягкого декодера кодов Рида — Маллера. Метод достижения цели заключается в экспериментальном исследовании декодера с использованием специально построенной имитационной модели помехоустойчивого канала передачи данных. Источник и приемник сообщений модели оперируют цифровыми данными, заданными полем F_3. Линия связи построенной модели в зависимости от настроек выдает цифровые или непрерывные сигналы. В случае непрерывных сигналов рассматриваются два варианта базовых искажений сигнала и их комбинации. Помехоустойчивость моделируемых каналов связи обеспечивается применением кодов Рида — Маллера второго порядка, заданных над полем F_3, и нового декодера мягких решений для этих кодов. Результаты проведенных имитационных экспериментов показали, что исследуемый декодер как в цифровых, так и в полунепрерывных каналах позволяет исправлять ошибок больше, чем гарантируется минимальным кодовым расстоянием. Наибольшую эффективность декодер показал при использовании его в полунепрерывных каналах связи. Корректирующая способность декодера значительно зависит от типа линии связи и вида искажений, поражающих сигналы, и не чувствительна к местоположению ошибок внутри кодового слова. Сделаны выводы о возможности использования нового декодера в каналах связи низкого качества для обеспечения помехоустойчивости, а также в ряде криптографических приложений.

Ключевые слова: троичный канал связи, троичные коды Рида — Маллера, декодер мягких решений, математическая модель канала связи, экспериментальное исследование корректирующей способности кода, исправление ошибок за границей половины минимального расстояния кода.

The research objective is to study the correcting capacity of a new soft decoder of Reed-Muller codes. The technique of achieving the goal is an experimental study of the decoder using a specially built simulation model of the antinoise data transfer channel. The model message source and receiver handle the numeric data identified in F_3 field. The communication line of the constructed model produces digital or continuous signals depending on the settings. In the case of continuous signals, two variants of the basic signal distortion and their combinations are considered. Noise immunity of the simulated communication link is provided by using Reed-Muller second-order codes identified over F_3 field, and the new soft-decision decoder for these codes. The results of the simulation experiments show that the decoder under study in both digital and semicontinuous channel allows correcting more errors than it is guaranteed by the minimum code distance. The decoder has proved the most effective in the semicontinuous communication channels. The decoder's correcting capacity depends heavily on the communication line type and on the signal distortion mode; it is not sensitive to the error location within the codeword. Conclusions are made on the use of the new decoder in the low-rated communication channels to provide noise immunity, and in a number of the cryptographic applications.

Keywords: ternary channel, ternary Reed-Muller codes, soft-decision decoder, mathematical model of communication channel, experimental research of the code correcting capability, error control out of the half minimum code distance.

Введение. В разнообразных системах передачи и хранения информации для ее защиты от искажений используются алгебраические помехоустойчивые коды [1–3]. Одной из актуальных задач в настоящее время является разработка для

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** e-mail: broshka@nm.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

известных кодов новых декодеров, которые обладают какими-либо преимуществами по сравнению с известными декодерами. К таким преимуществам может относиться, например, увеличение скорости работы декодера или повышение корректирующей способности кодека. Так, в последние годы для обеспечения помехоустойчивости актуально применение декодеров мягких решений (ДМР), особенность которых состоит в том, что принятые из канала данные вводятся в декодер, минуя демодулятор [1]. Обычно использование ДМР дает лучшие результаты по сравнению с декодированием жестких решений, когда на вход декодера поступают значения с выхода демодулятора, преобразующего данные из канала в слова над фиксированным конечным алфавитом. Эффективность ДМР основана на том, что в отсутствие демодулятора не накапливаются ошибки квантования, однако обычно декодеры с технологией ДМР обладают большей сложностью — например, [2].

В работе [4] построен мягкий декодер кодов Рида — Маллера второго порядка, заданных над полем Галуа F_3 (далее $RM_3(2, m)$, m — параметр кода). При этом за основу взят декодер двоичных кодов Рида — Маллера второго порядка В. М. Сидельникова и А. С. Першакова [5], обладающего значительной корректирующей способностью (он исследовался в работах [6–7]). Однако нет теоретической или экспериментальной оценки корректирующей способности нового алгоритма.

Цель данной работы состоит в экспериментальном исследовании корректирующей способности нового мягкого декодера [4] троичных кодов Рида — Маллера второго порядка при различных условиях его эксплуатации. Для достижения цели необходимо решить две задачи. Во-первых, построить модель канала с троичным входом. Источник и приемник сообщений данной модели оперируют цифровыми данными, заданными над полем F_3, а линия связи в зависимости от настроек выдает цифровые или непрерывные сигналы над полем комплексных чисел. Во-вторых, провести экспериментальное исследование корректирующей способности нового декодера при различных видах искажений кодовых слов. С этой целью используется программная реализация построенной модели троичного канала связи.

Модель троичного канала передачи данных с использованием канального ДМР-кода Рида — Маллера второго порядка. Рассмотрим элементы модели канала с троичным входом и схему прохождения данных по модели (рис. 1).

Источник сообщений выдает информационные векторы

$$\overline{m} = (m_1, m_2, ..., m_k) \in F_3^k,$$

где F_3^k — линейное k-мерное пространство, заданное над полем Галуа F_3.

Затем в кодере канала эти векторы обрабатываются с использованием линейного блочного кода $RM_3(2, m)$ Рида — Маллера второго порядка длины n и размерности $k(<n)$, заданного над полем F_3.

Сформированные кодовые векторы $\overline{c} \in F_3^n$ поступают в передатчик, который служит интерфейсом к линии связи и преобразует векторы $\overline{c} \in F_3^n$ в

$$\overline{z} = (z_1, z_2, ..., z_n)(\in C_3^n),$$

где C — поле комплексных чисел, сигналы z_s, $s = 1,...,n$ принадлежат мультипликативной группе $C_3 = \left\{ e^{i\frac{2\pi}{3}q} \right\}_{q=0,1,2}$ корней третьей степени из единицы.

Преобразование аддитивной группы поля F_3 в мультипликативную группу C_3 происходит с помощью естественного изоморфизма $\phi : F_3 \to C_3$, который определяется по формуле

$\phi(j) = e^{i\frac{2\pi}{3}j}, \ j \in F_3$.

Сформированные векторы $\overline{z} = (z_1, z_2, ..., z_n)$ передатчик на физическом уровне отправляет в линию связи. Физический аналог сигнала z_j можно получить, например, с помощью модуляции с непрерывной фазой [2]. Диаграмма пространства таких сигналов иллюстрируется рис. 2.

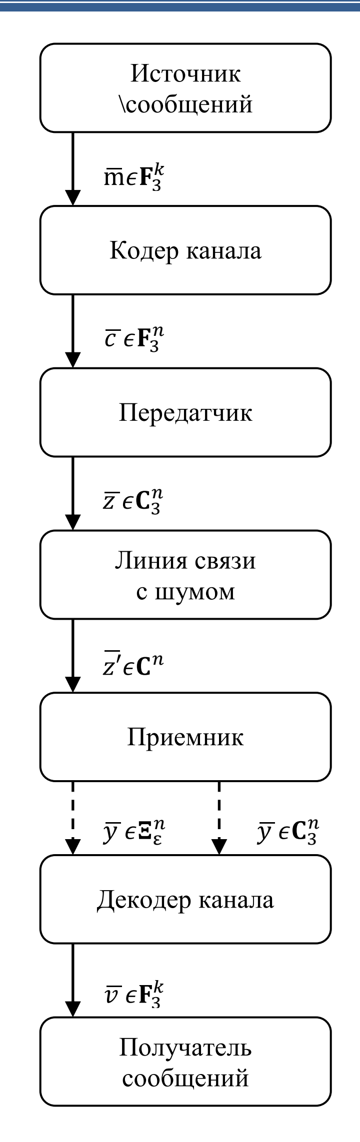


Рис. 1. Схема прохождения данных в моделируемом канале

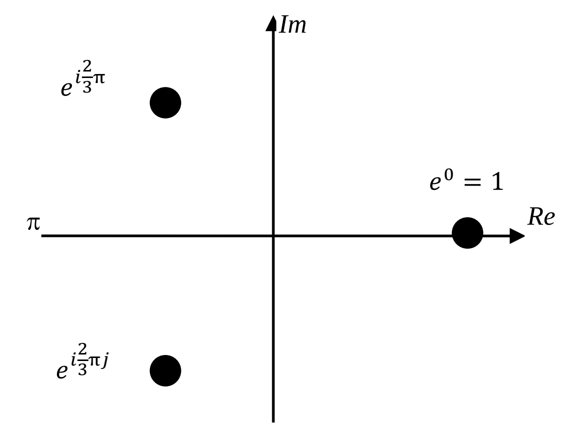


Рис 2. Диаграмма пространства сигналов

В силу искажений, действующих в линии связи, на выходе из нее формируются символы из поля *С*. Будем рассматривать два базовых вида искажений элементов вектора $\bar{z} \in C_3^n$ в линии связи — а именно, искажения по фазе и по амплитуде. Под искажением по фазе будем понимать фазовый сдвиг сигнала z_j по единичной окружности. Искажением по амплитуде будет смещение сигнала с единичной окружности по радиусу. Предположим, что под воздействием шума координаты вектора $\bar{z}$ подвергаются различным комбинациям базовых искажений и формируется вектор $\bar{z}' \in C^n$. Графическая иллюстрация искажений сигнала представлена в левой верхней четверти рис. 3. Так, сигнал $e^{i\frac{2\pi}{3}}$ показан черной точкой, голубая точка соответствует его искажению по амплитуде, зеленая — по фазе, а желтая — комбинации двух видов искажения.

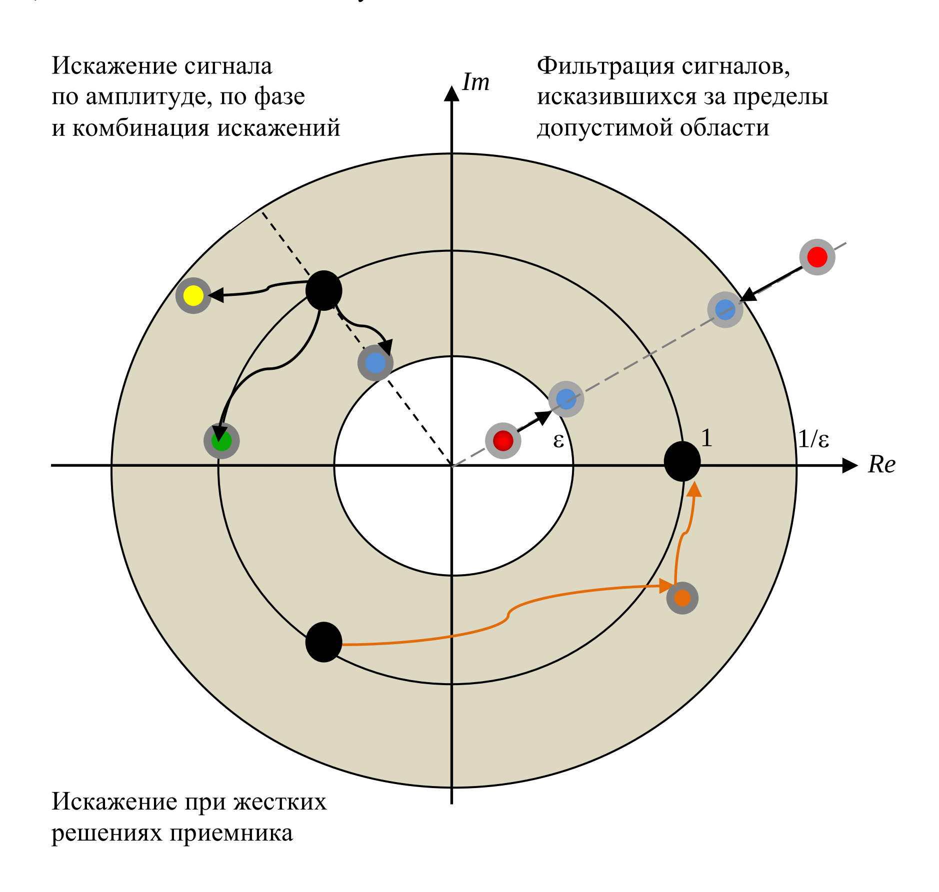


Рис. 3. Примеры искажения сигнала и его фильтрации

Вектор $\bar{z}' \in C^n$ поступает на вход приемника, который в зависимости от настроек может выдавать мягкие или жесткие решения о принятом сигнале. Так, в случае жестких решений приемник преобразует входной вектор $\bar{z}' \in C^n$ в вектор $\bar{y} = (y_1, ..., y_n) \in C_3^n$, независимо от типа искажений, поразивших вектор в линии связи. В этом случае может быть использован, например, принцип решающих областей. Таким образом, в результате воздействия ошибки символ $z_s = e^{i\frac{2\pi}{3}a} \in C_3$, $a \in F_3$ может перейти в один из двух других возможных символов: $y_s = e^{i\frac{2\pi}{3}b} \in C_3$, $b \in F_3$, $a \neq b$. В построенной реализации модели такой переход осуществляется равновероятно. На рис. 3 показано, что сигнал $e^{i\frac{4\pi}{3}}$, обозначенный черной точкой, в результате искажения перешел в сигнал, обозначенный коричневой точкой, а приемник с жесткими решениями преобразовал его в сигнал e^0.

В случае мягких решений приемник фильтрует амплитуду каждого сигнала z_s' таким образом, чтобы значения сигнала y_s на выходе приемника принадлежали допустимой области

$$\Xi_\varepsilon = \{\xi \in C \mid \varepsilon \leq |\xi| \leq 1/\varepsilon\},$$

где $\varepsilon (\in (0;1])$ — параметр приемника.

После фильтрации на выходе приемника формируется вектор $\bar{y} = (y_1, ..., y_n) \in \Xi_\varepsilon^n$. Действие фильтра иллюстрируется на правой верхней четверти рис. 3: сигналы, обозначенные красными точками, попавшие в результате искажений в линии связи за пределы допустимой области, переводятся приемником в сигналы, лежащие в области допустимых значений, с помощью смещения их по радиусу к ближайшей точке на границе области Ξ_ε. Допустимая область выделена на рис. 3 серым цветом. Используя принятую в теории связи терминологию, можно говорить, что в случае работы приемника в режиме жестких решений реализуется цифровой канал, а в случае работы в режиме мягких решений — полунепрерывный канал.

Вектор $\bar{y}$ из пространства Ξ_ε^n или $C_3^n(\subset \Xi_\varepsilon^n)$ с выхода приемника (в зависимости от режима работы приемника) направляется в декодер мягких решений, цель которого — восстановить информационный вектор $\overline{m} \in F_3^k$, посланный ранее источником сообщений. Результат декодирования $\bar{v}\,(\in F_3^k)$ поступает получателю сообщения. В зависимости от уровня повреждения вектора $\bar{z}$ в канале связи результат декодирования может совпадать с исходным вектором или отличаться от него. Если $\overline{m} = \bar{v}$, то принято говорить о верном декодировании, иначе говорят об ошибке декодирования.

Определение кодов Рида — Маллера *RM*₃(2,*m*). Используя [4], [8], определим троичный код Рида — Маллера $RM_3(2,m)$ второго порядка с параметром $m \geq 2$, следующим образом:

$$RM_3(r,m) = \{\left(f(\bar{\alpha}_1),..., f(\bar{\alpha}_n)\right) \mid f \in F_3^{(2)}[x_1,...,x_m]\} \in F_3^n,$$

где $n = 3^m$ — длина кода, множество

$$\{\bar{\alpha}_1,...,\bar{\alpha}_n\} \left(\bar{\alpha}_j = (\alpha_{j_1},...,\alpha_{jm})\right) \qquad (1)$$

представляет собой упорядочение всех точек векторного пространства F_3^m.

Далее в работе используем следующее упорядочение:

— по целочисленной сумме координат $\rho(\bar{\alpha})$ вектора $\bar{\alpha} \in F_3^m$ как натуральных чисел от меньшего к большему, а при одинаковых суммах — обычное лексикографическое упорядочение слева направо от большего к меньшему;

— $F_3^{(2)}[x_1,..., x_m]$ — кольцо полиномов степени не выше 2 от *m* переменных над полем F_3.

Степень $\deg(f)$ полинома f определяется как максимальная степень составляющих его ненулевых мономов, а степень ненулевого монома $\phi = x_1^{\gamma_1}...x_m^{\gamma_m} = a\bar{x}^{\bar{\gamma}}$ задается равенством $\deg(\phi) = \rho(\bar{\gamma})$.

Вектор $\bar{v} \in F_3^k$, где $k = 1 + m + C_{m+1}^2$, составленный из коэффициентов информационного полинома $v(\bar{x}) \in F_3^{(2)}[x_1,..., x_m]$, называется информационным вектором. При этом предполагается, что для нумерации элементов информационного вектора, как и кодового, используется упорядочение (1). Кодирование информационного вектора осуществляется путем вычисления значений соответствующего информационного полинома в точках пространства F_3^m, упорядоченного в соответствии с (1). Способы нахождения числа гарантированно исправляемых ошибок в общем виде см. в [4], [8]. Далее в работе будем использовать уже вычисленные значения.

Конструкция ДМР для кодов *RM*₃ (2,*m*). На вход алгоритма подаются параметр *m* кода $RM_3(2,m)$, связанные с *m* значения длины n и размерности k кода $RM_3(2,m)$, а также полученный из канала зашумленный кодовый вектор $\bar{Y} = (Y_{\bar{\alpha}_1},...,Y_{\bar{\alpha}_n}) \in \Xi_\varepsilon^n(\subset C^n)$, элементы которого занумерованы в соответствии с (1). На выходе алгоритма формируется восстановленный информационный вектор $\bar{f}$.

Шаг 1. Построим набор векторов из $C^n : \{\nabla_{\bar{\gamma}}(\bar{Y}) = (Y_{\bar{\gamma}+\bar{\alpha}_1}Y_{\bar{\alpha}_1}^{-1},...,Y_{\bar{\gamma}+\bar{\alpha}_n}Y_{\bar{\alpha}_n}^{-1})\}_{\bar{\gamma}\in F_3^m, \bar{\gamma}\neq 0}$,

где $Y_{\bar{\alpha}_s}^{-1}$ — число, сопряженное $Y_{\bar{\alpha}_s}$, векторы $\bar{\gamma} \in F_3^m$ упорядочены по (1). Далее везде, где нумерация элементов векторов или наборов осуществляется векторными переменными из F_3^m, по умолчанию будем использовать упорядочение (1).

Шаг 2. Рассмотрим все значения $\bar{\gamma} \in F_3^m$, $\bar{\gamma} \neq \bar{0}$ и для фиксированного $\bar{\gamma}$ введем обозначение $\bar{P} = (P_{\bar{\alpha}_1},...,P_{\bar{\alpha}_n}) := \nabla_{\bar{\gamma}}(\bar{Y})$.

Сформируем два набора значений: $B=(B_{\bar\gamma_1}=\bar 0, B_{\bar\gamma_2},...,B_{\bar\gamma_n})$ и $A=(A_{\bar\gamma_1}=\bar 0, A_{\bar\gamma_2},...,A_{\bar\gamma_n})$ B, где $B_{\bar\gamma}$ — вектор $\bar\beta=(\beta_1,...,\beta_m)\in F_3^m$, на котором достигается $A_{\bar\gamma}$ — минимальное значение функционала

$$A(\bar P,\bar\beta)=\sum_{s=1}^{n}\left|P_{\bar\alpha_s}-e^{i\frac{2}{3}\pi(\beta_0+\langle\bar\beta,\bar\alpha_s\rangle)}\right|(\in R),$$

где $\langle\bar\beta,\bar\alpha_s\rangle(\in F_3)$ — скалярное произведение, $\beta_0\in F_3$.

Шаг 3. Построим $(n\times m)$-массив Θ, строки которого инициализируем значениями из набора B: $\Theta(\bar\alpha_s)=B_{\bar\alpha_s}=(\theta_{1,\bar\alpha_s},...,\theta_{m,\bar\alpha_s})\in F_3^m$. Далее j-й столбец полученного массива будем обозначать Θ_j, $j=1,...,m$. Для каждого $\bar\alpha_s\in F_3^m$ и всех $\bar\beta_j\in F_3^m$ таких, что $\bar\beta_j\neq\bar\alpha_s$, вычислим

$$\Theta(\bar\alpha_s):=Maj(\Theta(\bar\alpha_s+\bar\beta_j)-\Theta(\bar\beta_j))_{\bar\beta_j\in F_3^m,\bar\beta_j\neq\bar\alpha_s},$$

где функция Maj возвращает элемент, встречающийся наибольшее число раз.

Шаг 4. Для каждого $j=1,...,m$ найдем d_j как минимум функционала

$$T_j(\phi)=\sum_{s=1}^{n}A_{\bar\alpha_s}\left|e^{i\frac{2}{3}\pi(2\phi(\bar\alpha_s)-\theta_{js})}-1\right|(\in R),$$

заданного на множестве всех линейных однородных полиномов вида $\phi(\bar x)=\sum_{q=1}^{m}\phi_q x_q$, $\phi_q\in F_3$. Полином ϕ, на котором достигается минимум, обозначим $\omega^{(j)}(\bar x)=\sum_{q=1}^{m}\omega_q^{(j)}x_q$.

Вычислим $\psi(\bar x)=\sum_{q\le j}a_{qj}x_qx_j$, где $\bar x\in F_3^m$, $a_{qj}\in F_3$, $q,j\in[1,...,m]$, $a_{qj}=a_{jq}$ и

$$a_{qj}=\begin{cases}\omega_j^{(q)}, если\ d_q<d_j\\ \omega_q^{(j)}, если\ d_q\ge d_j\end{cases}.$$

Шаг 5. Среди множества векторов $\bar\zeta=(\zeta_1,...,\zeta_m)\in F_3^m$ и значений $\zeta_0\in F_3$ найдем те, которые минимизируют значение функционала:

$$\Phi(Y,\bar\zeta)=\sum_{s=1}^{n}\left|Y_{\bar\alpha_s}-e^{i\frac{2}{3}\pi(\zeta_0+\langle\bar\zeta,\bar\alpha_s\rangle+\psi(\bar\alpha_s))}\right|(\in R),$$

где $\langle\bar\zeta,\bar\alpha_s\rangle(\in F_3)$ – скалярное произведение.

Из найденных значений составим полином $\varphi(\bar x)=\sum_{j=1}^{m}c_jx_j+c_0$, где коэффициенты $c_k\in F_3$, $k=0,...,m$ соответствуют найденным значениям $\bar\zeta$ и ζ_0.

Результат декодирования строим в виде полинома: $f(\bar x)=\psi(\bar x)+\varphi(\bar x)$, который определяет искомый информационный вектор $\bar f$.

Экспериментальное исследование. В работе проведено моделирование передачи закодированной информации по троичному каналу связи как с жесткими, так и с мягкими решениями приемника. Канал связи моделировался с использованием информационной системы «Канал» [9], для которой были созданы специальные библиотеки. При проведении экспериментов параметры модели задавались следующими входными данными:

— значение m, определяющее параметры помехоустойчивого кода $RM_3(2,m)$;

— число ошибок t, поражающих кодовое слово;

— тип приемника.

Если использовался приемник с мягкими решениями, то применялись дополнительные настройки, указывающие на вид используемых базовых искажений элементов кодовых слов, а также параметр приемника ε, задающий допустимую область значений Ξ_ε, при использовании искажений по амплитуде. Проведено 10^4 испытаний для каждого набора параметров модели.

Отметим, что при моделировании потоков ошибок часто используется понятие пораженных символов, т. е. попавших под воздействие искажений, но по случайности не изменивших своего значения [3], [10]. При проведении экспериментов такая ситуация намеренно не моделировалась, т. е. в результате наложения t ошибок на кодовое слово это слово отличалось от исходного ровно в t позициях.

В табл. 1 описаны основные параметры кодов $RM_3(2,m)$, результаты экспериментального исследования которых представлены ниже. В этой таблице использованы следующие обозначения: m — параметр кода $RM_3(2,m)$; n, k и t — длина, размерность кода и число гарантированно исправляемых ошибок (определяемое по минимальному расстоянию кода). Отношение t/n задает максимальное значение вероятности ошибки в канале связи, при котором код «гарантирует» выдачу верного результата. Отметим, что при ошибках, вероятность которых превышает t/n, классический детерминированный декодер всегда выдает ошибочные результаты. Параметр t/n показывает избыточность кода. При необходимости далее будем использовать традиционную краткую запись параметров кода в форме тройки $[n, k, d]$, где d — минимальное кодовое расстояние.

Таблица 1

Основные параметры кодов $RM_3(2,m)$, $m = 2, 3, 4, 5$

m	n	k	t	t/n	n/k
2	9	6	1	0,111	1,5
3	27	10	4	0,148	2,7
4	81	15	13	0,160	5,4
5	243	21	40	0,164	11,57
6	729	28	121	0,165	26,03

Проведенная серия экспериментов по определению корректирующей способности нового ДМР-кода $RM_3(2,m)$ в случае применения его в канале с жесткими решениями приемника показала значительное повышение числа исправляемых ошибок по сравнению с детерминированным декодером. Изменение значения максимальной вероятности исправляемых ошибок новым декодером по сравнению с детерминированным декодером представлено в табл. 2. В верхней строке таблицы указаны максимальные вероятности ошибок, исправление которых гарантируется кодом (параметр t/n, см. табл. 1). Вторая строка таблицы содержит максимальные вероятности ошибок, при которых новый мягкий декодер выдал верный результат во всех проведенных экспериментах (т. е. в 100 % случаев). Из приведенных результатов видно, что декодер значительно улучшил результат, гарантированный кодом, во всех случаях, кроме кода $RM_3(2,2)$. Так для $RM_3(2,3)$ корректирующая способность увеличилась на 34 %, для $RM_3(2,4)$ — на 54 %, а для $RM_3(2,5)$ — на 157 % (код гарантирует исправление 40 ошибок на кодовое слово, а декодер во всех проведенных экспериментах исправил все ошибки до 103 включительно на кодовое слово). Третья и четвертая строки таблицы отличаются от второй вероятностью выдачи декодером верного результата (третья строка — верный результат в 95 % случаев, четвертая — в 90 % случаев).

Таблица 2

Корректирующая способность нового декодера кода $RM_3(2, m)$
в случае применения его в канале с жесткими решениями приемника

Максимальное значение вероятности исправляемых ошибок, гарантируемое	Параметр кода $RM_3(2,m)$			
	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$	$m = 5$
кодом $RM_3(2,m)$	0,111	0,11	0,160	0,165
декодером с вероятностью 1	0,111	0,148	0,247	0,424
декодером с вероятностью 0,95	0,111	0,185	0,321	0,428
декодером с вероятностью 0,9	0,111	0,185	0,333	0,436

Для определения чувствительности нового ДМР-кода $RM_3(2,m)$ к различным базовым типам искажений и их комбинациям проведена серия экспериментов с различными настройками параметров модели канала связи. На рис. 4 представлен график зависимости вероятности верного декодирования от вероятности ошибки в канале связи для кода $RM_3(2,4)$.

Рассмотрим график подробнее. Кривая с подписью «Дискретные ошибки» отражает результаты экспериментов, проведенных в канале связи с жесткими решениями приемника. Напомним, что в этом случае ошибка переводит сигнал в один из двух других разрешенных сигналов из поля C_3. Кривая с подписью «Ошибки по фазе» отражает результаты экспериментов, проведенных в канале связи, где происходят только ошибки типа сдвига сигнала по фазе. Кривые с подписью «По фазе и амплитуде» отражают результаты экспериментов, проведенных в канале связи, где происходят различные комбинации ошибок по фазе и по амплитуде, в скобках указан параметр приемника ε, опреде-

ляющий ширину допустимой области Ξ_ε. Легко видеть, что чем меньше значение ε, тем область Ξ_ε больше. Эксперименты показали, что чем шире область допустимых значений (т. е. чем значения ε меньше), тем хуже корректирующая способность декодера. Однако для каждого кода находится такое значение ε, при увеличении которого значительного изменения корректирующей способности практически не происходит. Так для кода $RM_3(2,4)$ результаты экспериментов при значениях $\varepsilon \in [0.5, 1]$ практически неразличимы. На графике не представлена зависимость корректирующей способности декодера в случае, когда происходят только ошибки по амплитуде. Эксперименты показали, что декодер не чувствителен к таким ошибкам, если не происходит сдвига сигнала по фазе. Так, для числа ошибок типа по амплитуде от 1 до длины n кода декодер всегда выдает верный результат. Отметим, что взаимное положение кривых, представленных на графике, повторяется для различных кодов $RM_3(2,m)$, $m > 2$.

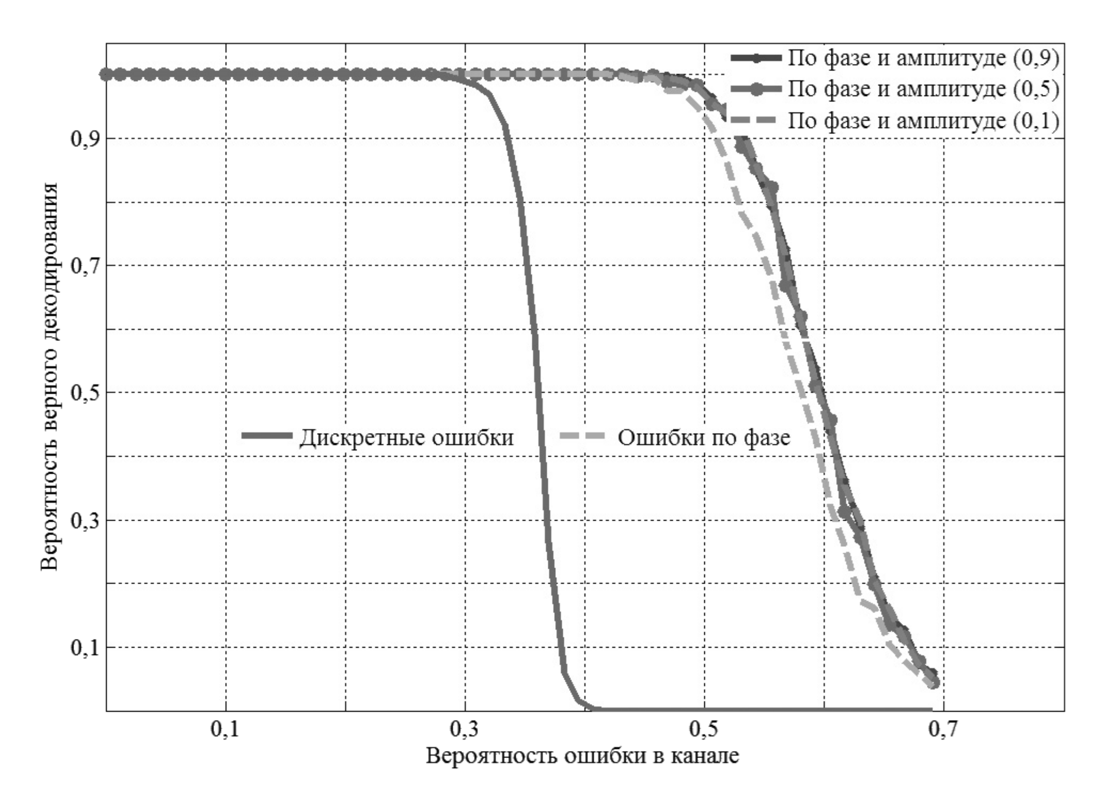


Рис. 4. Результаты исследования [81, 15, 27]-кода $RM_3(2,4)$

В работе проведена серия экспериментов по поиску зависимости корректирующей способности декодера от расположения ошибок внутри кодового слова. Результаты экспериментов показали, что декодер не чувствителен к местоположению ошибок.

Из табл. 1 видно, что [243, 21, 81]-код $RM_3(2,5)$ обладает достаточно высокой избыточностью n/k = 11,6. Возникает очевидный вопрос: целесообразно ли использовать этот код с его трудоемким алгоритмом декодирования или имеет смысл использовать коды с большой избыточностью и простыми декодерами? Рассмотрим в качестве кода, имеющего хорошую корректирующую способность и простой алгоритм мажоритарного декодирования, код повторения [1], [11] с близким значением избыточности и сравним корректирующие способности кода $RM_3(2,5)$ и [11,1,11]-кода многократного повторения над алфавитом F_3, который гарантированно исправляет 5 ошибок на 1 кодовое слово и обладает избыточностью, равной 11. Для того, чтобы сравнять длины кодовых слов обоих кодов, объединим 22 кодовых слова кода повторения — например, с помощью техники прямой суммы кодов [1], [11]. Таким образом, длина составного кодового слова — 242 символа, и код может гарантировано исправить 110 символов в этом составном слове, но только при жестком ограничении: ошибочные символы должны быть распределены внутри кодового слова равномерно (не более 5 ошибок на 11-символьный отрезок кодового слова). Код Рида — Маллера может гарантированно исправить только 40 ошибок внутри кодового слова длиной 234 символа, однако результат его работы не зависит от местоположения ошибок. Если использовать новый мягкий декодер кодов Рида — Маллера, то в рассматриваемом случае можно будет исправить 103 ошибки, также независимо от места их положения. Более того, если применять новый декодер в полунепрерывном канале связи, то декодер сможет исправить не менее 150 ошибок, вне зависимости от места их положения внутри кодового слова. Декодер кода многократного повторения не предназначен для исполь-

зования в полунепрерывном канале связи. Очевидно, что код многократного повторения, который обычно рассматривают как код, обладающий большой корректирующей способностью, уступает по этому параметру коду $RM_3(2,5)$, хотя, очевидно, выигрывает по скорости работы алгоритмов кодирования и декодирования. Для кодов $RM_3(2,m)$ с другими значениями параметра m аналогичные рассуждения также показывают выигрыш в корректирующей способности по сравнению с кодом многократного повторения. При этом с ростом m данный выигрыш растет, а с уменьшение значения m — падает.

Заключение. Результаты проведенных экспериментов показали, что исследуемый декодер троичного кода Рида — Маллера второго порядка обладает значительной корректирующей способностью по сравнению с классическими детерминированными декодерами — например, с декодированием по минимуму расстояния Хэмминга. Новый декодер мягких решений может быть применен для обеспечения помехоустойчивости в каналах связи низкого качества, используемых, однако, для передачи ценных сообщений. Так, на графике 4 видно, что даже при вероятности ошибки в канале связи, равной 0,5, т. е. значению, при котором говорят о разрыве линии связи, декодер выдает верные результаты с высокой достоверностью. Кроме традиционного применения декодера для обеспечения помехоустойчивости он может быть использован в таких практических приложениях, как восстановление информации, полученной по побочным (отводным) каналам связи [12], при построении криптосистем типа Мак-Элиса и Ниддерайтера [11].

Библиографический список

1. Морелос-Сарагоса, Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение / Р. Морелос-Сарагоса. — Москва : Техносфера, 2005. — 320 с.

2. Прокис, Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис. — Москва : Радио и связь, 2000. — 800 с.

3. Деундяк, В. М. Имитационная модель цифрового канала передачи данных и алгебраические методы помехоустойчивого кодирования / В. М. Деундяк, Н. С. Могилевская // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2001. — Т. 1, № 1. — С. 98–104.

4. Деундяк, В. М. Модель троичного канала передачи данных с использованием декодера мягких решений кодов Рида — Маллера второго порядка / В. М. Деундяк, Н. С. Могилевская // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2015. — № 1. — С. 16–23.

5. Сидельников, В. М. Декодирование кодов Рида — Маллера при большом числе ошибок / В. М. Сидельников, А. С. Першаков // Проблемы передачи информации. — 1992. — Т. 28, № 3. — С. 80–94.

6. Loidreau, P. Modified version of Sidel'nikov-Pershakov decoding algorithm for binary second order Reed-Muller codes / P. Loidreau, B. Sakkour // Proc. Ninth International Workshop on Algebraic and Combinatorial Coding theory, ACCT-9. — Kranevo, 2004. — P. 266–271.

7. Могилевская, Н. С. Экспериментальное исследование декодеров кодов Рида — Маллера второго порядка / Н. С. Могилевская, В. Р. Скоробогат, В. С. Чудаков // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2008. — Т. 8, № 3. — С. 231–237.

8. Pellikaan, R. List decoding of q-ary Reed-Muller Codes / R. Pellikaan, X.-W. Wu // IEEE Transactions on Information Theory. — 2004. — Vol. 50 (1). — P. 679–682.

9. Информационная система «Канал» : св-во о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2008614602 / Н. С. Могилевская, К. А. Чугунный ; заявл. 31.07.08 ; зарегистрир. 24.09.08. — 17 с.

10. Деундяк, В. М. Математическое моделирование источников ошибок цифровых каналов передачи данных: учеб. пособие / В. М. Деундяк, Н. С. Могилевская. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2006. — 70 с.

11. Могилевская, Н. С. Введение в теорию информации: учеб. пособие / Н. С. Могилевская. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2013. — 125 с.

12. Деундяк, В. М. О стойкости кодового зашумления к статистическому анализу наблюдаемых данных многократного повторения / В. М. Деундяк, Ю. В. Косолапов // Моделирование и анализ информационных систем. — 2012. — Т. 19, № 4. — С. 110–127.

References

1. Morelos-Zaragoza, R. Iskusstvo pomekhoustoychivogo kodirovaniya. Metody, algoritmy, primenenie. [The Art of Error Correcting Coding. Methods, algorithms, application.] Moscow: Tekhnosfera, 2005, 320 p. (in Russian).

2. Proakis, J. Tsifrovaya svyaz'. [Digital Communications.] Moscow: Radio i svyaz', 2000, 800 p. (in Russian).

3. Deundyak, V.M., Mogilevskaya, N.S. Imitatsionnaya model' tsifrovogo kanala peredachi dannykh i algebraicheskie metody pomekhoustoychivogo kodirovaniya. [Simulation model of digital data transmission channel and algebraic methods for error-correcting coding.] Vestnik of DSTU, 2001, vol. 1, no. 1, pp. 98–104 (in Russian).

4. Deundyak, V.M., Mogilevskaya, N.S. Model' troichnogo kanala peredachi dannykh s ispol'zovaniem dekodera my-

agkikh resheniy kodov Rida — Mallera vtorogo poryadka. [Ternary data channel model using the soft-decision decoder of Reed - Muller second-order codes.] Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Technical Sciences. 2015, no. 1, pp. 16–23 (in Russian).

5. Sidelnikov, V.M., Pershakov, A.S. Dekodirovanie kodov Rida — Mallera pri bol'shom chisle oshibok. [Decoding of Reed - Muller Codes with a Large Number of Errors.] Problems of Information Transmission, 1992, vol. 28, no. 3, pp. 80–94 (in Russian).

6. Loidreau, P., Sakkour, B. Modified version of Sidel'nikov-Pershakov decoding algorithm for binary second order Reed-Muller codes. Proc. Ninth International Workshop on Algebraic and Combinatorial Coding theory, ACCT-9. Kranevo, 2004, pp. 266–271.

7. Mogilevskaya, N.S., Skorobogat, V.R., Chudakov, V.S. Eksperimental'noe issledovanie dekoderov kodov Rida — Mallera vtorogo poryadka. [Experimental study of second-order Reed-Muller codes.] Vestnik of DSTU, 2008, vol. 8, no. 3, pp. 231–237 (in Russian).

8. Pellikaan, R., Wu, X.-W. List decoding of q-ary Reed-Muller Codes. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, vol. 50 (1), pp. 679–682.

9. Mogilevskaya, N.S., Chugunny, K.A. Informatsionnaya sistema «Kanal» : sv-vo o gos. registratsii programm dlya EVM № 2008614602. [Information system Channel: Certificate of Software State Registration no. 2008614602, 2008.] (in Russian).

10. Deundyak, V.M., Mogilevskaya, N.S. Matematicheskoe modelirovanie istochnikov oshibok tsifrovykh kanalov peredachi dannykh: ucheb. posobie. [Mathematical modeling of error sources of digital data channels: study guide.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2006, 70 p. (in Russian).

11. Mogilevskaya, N.S. Vvedenie v teoriyu informatsii: ucheb. posobie. [Introduction to the theory of information: study guide.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2013, 125 p. (in Russian).

12. Deundyak, V.M., Kosolapov, Y.V. O stoykosti kodovogo zashumleniya k statisticheskomu analizu nablyudae-mykh dannykh mnogokratnogo povtoreniya. [On the Firmness Code Noising to the Statistical Analysis of the Observable Data of Repeated Repetition.] Modelirovanie i analiz informatsionnykh system, 2012, vol. 19, no. 4, pp. 110–127 (in Russian).

Поступила в редакцию 29.10.2014
Сдана в редакцию 06.11.2014
Запланирована в номер 28.01.2015

БЕЗОПАСНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА
SAFETY OF HUMAN ACTIVITY



УДК 621:658:331.43:005.963 DOI 10.12737/10396

Оценка риска человеческого фактора в системе «персонал — подъемные механизмы — производственная среда» на предприятиях машиностроения*

Е. В. Егельская[1], А. А. Короткий[2]**
[1,2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Risk assessment of the human factor in 'staff - hoists - production environment' system at machine-building enterprises ***

E.V. Yegelskaya[1], A.A. Korotkiy[2]**

[1,2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью исследования является разработка метода оценки риска человеческого фактора в системе «персонал — подъемные механизмы — производственная среда». Предложенный метод позволяет определить уровень подготовки персонала и принятия соответствующих управленческих решений на машиностроительных предприятиях, эксплуатирующих подъемные механизмы. Представлена интерпретация реализации возможного неблагоприятного события (аварии/инцидента, несчастного случая). По результатам анализа материалов расследований аварий и несчастных случаев на машиностроительных предприятиях, где эксплуатируются подъемные механизмы, и проведенного анкетирования выделены и сгруппированы характерные опасные действия обслуживающего персонала и должностных лиц (руководителей и специалистов). В результате построена матрица, позволяющая определить возможность аварии/инцидента или несчастного случая от частоты ошибочных действий персонала. Проведенное исследование позволило сделать следующий вывод. На машиностроительных предприятиях 4-го класса опасности целесообразно применение метода экспертного анализа для оценки организационных причин ошибочных действий персонала при эксплуатации объектов, на которых установлены подъемные механизмы.

Ключевые слова: машиностроительные предприятия, оценка риска человеческого фактора, подъемные механизмы, подготовка персонала.

The research objective is to develop the technique of assessing a human factor risk in the 'staff - hoists - production environment' system. The proposed method allows evaluating the degree of staff training and of the appropriate managerial solutions at the machine-building enterprises operating hoists. Three groups of hazards associated, respectively, with the false staff operation, the hoist state, and the production environment of the machine builder, are considered. An interpretation of the potential adverse event instance (misfortune, incident, accident) is presented. Based on the analysis of the accident investigation reports at the machine-building enterprises operating hoists and on the conducted questionnaire surveys, the specific dangerous actions of the staff and executive officers (managers and expert personnel) are identified and classified. As a result, the matrix is constructed to determine the probability of potential accidents, incidents or misfortunes depending on the frequency of the false staff actions. The study allows drawing the following conclusion. At the machine-building enterprises of the 4th hazard class, it is considered expedient to apply the expert analysis method to assess the organizational human error causes when running the plants with hoists. Under these conditions, the method of risk assessment appears quite simple and effective in terms of the engineering safety analysis.

Keywords: machine-building enterprises, human factor risk assessment, hoists, personnel training.

Введение. Машиностроительные предприятия относятся к 4-му классу опасности [1], т. к. предполагают установку и эксплуатацию подъемных механизмов. Для таких предприятий нормативно-правовыми документами в области охраны труда и промышленной безопасности предусмотрено проведение риск-анализа. При оценке риска, связанного с аварией (инцидентом) на предприятиях машиностроения, следует проанализировать различные сценарии, отражающие как наиболее типичные и вероятные, так и неблагоприятные (как правило, маловероятные) события.

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**e-mail: egelskaya72@mail.ru, korot@novoch.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Базой для оценки риска служит процедура идентификации, основанная на представленной информации о следующих факторах:

— класс опасности производственной среды;

— работа технических систем;

— документированная частота отказов подъемных механизмов и ошибок персонала;

— статистические данные о несчастных случаях и пр.

Результатом идентификации является четкое описание всех потенциальных опасностей, обусловленных работой подъемных механизмов, установленных на машиностроительном предприятии. Таким образом, речь идет о возможной реализации неблагоприятного события.

Основная часть. В процессе идентификации рекомендуется рассматривать три группы опасностей, связанные с:

1) ошибочными действиями персонала;

2) состоянием подъемного механизма;

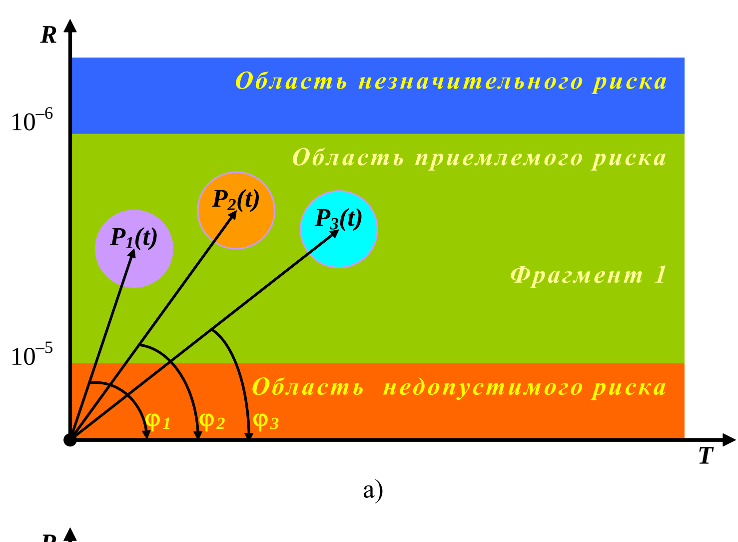
3) производственной средой машиностроительного предприятия, характеризующегося 4-м классом опасности.

На рис. 1 представлена графическая интерпретация реализации возможного неблагоприятного события (аварии/инцидента, несчастного случая), на которой вероятности опасностей $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$ изображены в виде векторов, связанных с нулевым значением риска. Данные векторы имеют направление, характеризующееся соответствующими углами $\varphi_1 — \varphi_3$. Дисперсия (рассеивание) вероятностей опасностей представлена в виде окружностей, центры которых связаны с концами векторов соответствующих рисков. Поле возможных реализаций опасностей с учетом частоты реализации неблагоприятного события статически разделено на три области:

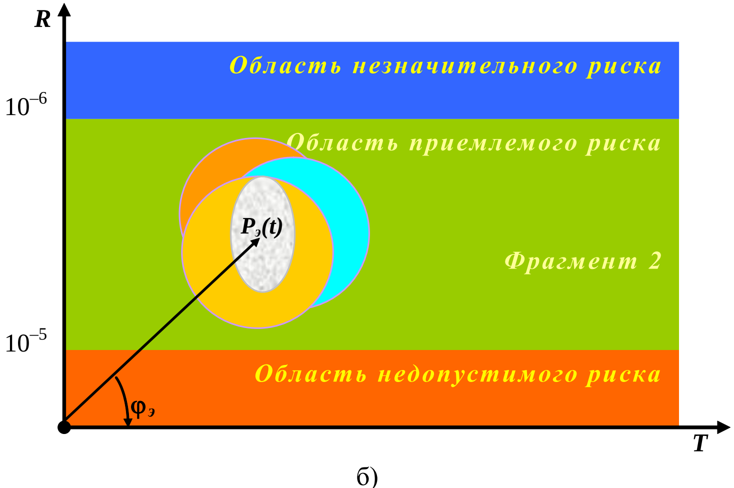
— область незначительного риска, $R_i > 10^{-6}$;

— область приемлемого риска, $10^{-5} \le R_i < 10^{-6}$;

— область недопустимого риска, $R_i < 10^{-5}$.



а)



б)

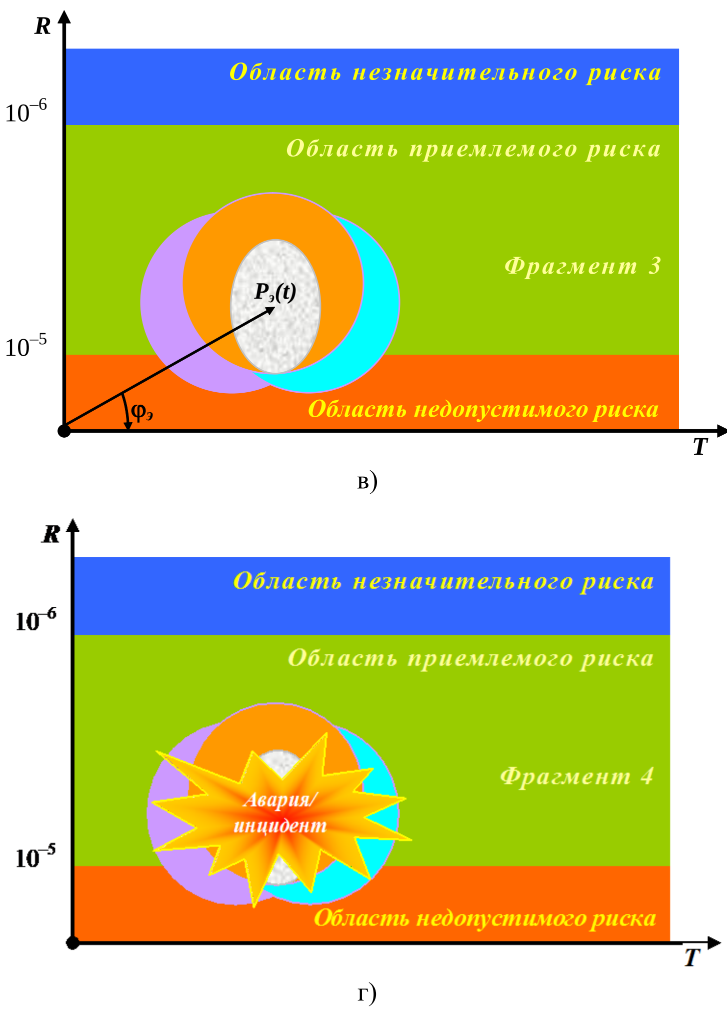


Рис. 1. Фрагменты процесса возникновения и развития неблагоприятного события (аварии/инцидента, несчастного случая): риск R во времени T

Следует отметить, что риски могут изменяться за счет следующих факторов:

— вероятностный характер ошибочных действий персонала;

— деградационные процессы, происходящие в подъемных механизмах;

— отклонения от нормированных параметров (частоты) технологического процесса производственной среды, в которой объект эксплуатируется (для машиностроительных предприятий — 4-й класс опасности).

Соответственно, варьируются вектор конкретной опасности и окружности, характеризующие ее дисперсию. Кинетика реализации неблагоприятного события во времени состоит в том, что при движении окружностей возможно пересечение их секторов либо пересечение линии области недопустимого риска на поле возможных реализаций. Область недопустимого риска всецело зависит от класса опасности — чем ниже класс, тем выше допустимый риск эксплуатации конкретного подъемного механизма. Квазистатический процесс неблагоприятного события представлен на рис. 1.

Полная реализация неблагоприятного события может быть представлена как сумма векторов событий:

$$P = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t),$$

где $P_1(t)$ — опасность, связанная с ошибочными действиями персонала; $P_2(t)$ — опасность, связанная с состоянием подъемного механизма; $P_3(t)$ — опасность, связанная с производственной средой, характеризующейся классом опасности.

Уровень обеспечения безопасности при эксплуатации подъемного механизма отвечает требуемому (допустимому), если выполняется условие:

$$\sum_{1}^{3} R_i \leq [R], \qquad (1)$$

где $[R]$ — допустимый (нормируемый) риск [2, 3] эксплуатации подъемного механизма; $[R] = 10^{-5}$ год$^{-1}$ — для подъемных механизмов, эксплуатируемых на опасных производственных объектах 4-го класса опасности.

На практике идентификации опасностей, исходящих от конкретного типа подъемного механизма и уровня подготовки обслуживающего персонала на машиностроительном предприятии, могут давать в качестве результата большое число сценариев неблагоприятных событий, которые оценить аналитическими методами очень сложно.

При этом детализированный количественный анализ частот и последствий не всегда осуществим. В таких ситуациях целесообразно выполнять качественное ранжирование сценариев, помещая их в матрицы, определяющие уровни рисков.

Ранее в работах [4, 5, 6] были исследованы опасности, связанные с состоянием подъемных механизмов (на примере подвесных канатных дорог и стальных канатов).

Опасности, связанные с ошибочными действиями персонала при эксплуатации подъемных механизмов, до настоящего времени не исследовались.

Характерные опасные действия персонала выделены и сгруппированы на основе:

— анализа материалов расследований аварий и несчастных случаев на машиностроительных предприятиях, где эксплуатируются подъемные механизмы [7];

— анкетирования более 500 человек.

Установлено, что опасные действия обслуживающего персонала и должностных лиц (руководителей и специалистов) различны, ввиду различия решаемых задач и выполняемых функций.

К опасным действиям рабочих отнесены:

— невосприятие или ошибочное (замедленное) восприятие сигнала, признаков опасности;

— ошибочная оценка ситуации;

— ошибочное или несвоевременное решение;

— неприятие решения;

— пропуск (невыполнение положенного действия или операции);

— несвоевременное действие;

— применение опасного приема или запрещенного действия;

— импульсивные действия.

Отдельно следует сказать об опасном состоянии — прострации (ступор).

К опасным действиям руководителей и специалистов отнесены:

— ошибочное восприятие признаков опасности;

— неадекватный анализ опасной ситуации;

— ошибочная оценка ситуации, состояния объекта;

— ошибочная формулировка проблемы;

— ошибочный прогноз событий или отсутствие прогноза;

— ошибочное или несвоевременное решение;

— непринятие решения;

— отсутствие или несвоевременная выдача соответствующих распоряжений;

— ошибочные распоряжения;

— неисполнение или несвоевременное исполнение распоряжений;

— некачественный или несвоевременный контроль;

— несвоевременная (неточная или ложная) информация о результатах контроля;

— отсутствие или ошибочная реакция по результатам контроля.

Соответствующие данные могут быть обобщены и представлены в виде таблицы.

Для определения частоты каждого из нежелательных событий или сценариев аварий (инцидентов), идентифицируемых на стадии выявления опасностей, и анализа риска целесообразно применять наиболее доступный метод, основанный на использовании мнения экспертов, — так называемый «индекс опасности».

Для предприятий 1–3-го классов опасности оценка риска осуществляется по другим видам опасности. Значения рисков в данном случае существенно выше, чем на машиностроительных предприятиях, т. к. не ограничиваются подъемными механизмами.

Таблица 1

Матрица риска ошибочных действий персонала

Частота возникновения ошибки, 1/год		Возможность наступления аварии или несчастного случая в производственной среде с учетом класса опасности*			
		Высокая	Средняя	Малая	Пренебрежимо малая
Часто	>1	A	A	A	C
Вероятно	$1–10^{-2}$	A	A	B	C
Возможно	$10^{-2}–10^{-4}$	A	B	B	C
Редко	$10^{-4}–10^{-6}$	A	B	C	D
Практически невероятно	$<10^{-6}$	B	C	C	D

*Величина риска: A — высокая, обязателен количественный анализ риска, или требуются особые меры обеспечения безопасности; B — средняя, желателен количественный анализ риска, или требуется принятие определенных мер безопасности; C — малая, рекомендуется проведение качественного анализа опасностей или принятие некоторых мер безопасности; D — незначимая, анализ и принятие специальных (дополнительных) мер безопасности не требуется

Рассмотрим применение этого метода для машиностроительных предприятий 4-го класса опасности. Оцениваться будут организационные причины, связанные с ошибочными действиями персонала при эксплуатации объектов, на которых установлены подъемные механизмы.

Метод экспертного анализа риска «индекс опасности» при эксплуатации подъемного механизма заключается в статистической обработке баллов, выставленных группой квалифицированных экспертов по значимым ошибкам обслуживающего персонала, обнаруженным при обследовании рабочих мест и анкетировании.

Примем вышеперечисленный перечень ошибок персонала как совокупность факторов для комплексной оценки и определим по 10-балльной шкале пределы изменения их значимости для конкретного подъемного механизма, эксплуатирующегося в определенной производственной среде машиностроительного предприятия 4-го класса опасности.

На основании матрицы риска ошибочных действий персонала (табл. 1) даны рекомендации по проведению риск-анализа. Риск оценивается в баллах и предлагаются соответствующие варианты управления безопасностью — управленческие решения относительно персонала, эксплуатирующего подъемные механизмы (табл. 2).

Таблица 2

Зависимость индекса опасности от уровня подготовки обслуживающего персонала, эксплуатирующего подъемные механизмы

Значения индекса опасности	Качественная оценка, характеризующая ошибки персонала	Уровень риска
> 10	У персонала отсутствует подготовка, эксплуатация (даже временная) запрещена	$1 \div 10^{-2}$
6–10	Персонал плохо подготовлен, эксплуатация не рекомендуется	$10^{-2} \div 10^{-4}$
2–6	Персонал недостаточно подготовлен, эксплуатация разрешена при усиленном контроле	$10^{-4} \div 10^{-6}$
< 2	Персонал подготовлен, эксплуатация разрешена	$<10^{-6}$

Для определения уровня подготовки персонала на первом этапе риск-анализа предлагается использовать тестовые задания и опросные листы, позволяющие устанавливать уровень психологической готовности. На втором этапе проводится обучение — теоретические и практические занятия с возможностью закрепления и применения полученных знаний при эксплуатации подъемных механизмов в определенной производственной среде [8, 9]. Данные табл. 2 позволяют принять решение по повышению уровня подготовки персонала [10].

Заключение. Принятый метод оценки риска является достаточно простым и эффективным с точки зрения инженерного анализа безопасности на машиностроительном предприятии при эксплуатации подъемных механизмов. Его применение позволяет комплексно оценивать уровень подготовки персонала и принимать соответствующие управленческие решения.

Библиографический список

1. О промышленной безопасности опасных производственных объектов : федер. закон № 116-ФЗ от 21.07.1997 [Электронный ресурс] // Консультант плюс. —Режим доступа:www.consultant.ru/document/cons_doc_ LAW_173548/ (дата обращения 17.02.14).

2. Такала, Ю. Охрана труда в цифрах и фактах. Направления совершенствования глобальной культуры охраны труда [Электронный ресурс] / Ю. Такала, Я. Грехэм, С. Мачида; Международная организация труда. — Режим доступа: http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---europe/---ro-geneva/--sromoscow/documents/genericdocument/ wcms_305834.pdf (дата обращения 17.02.14).

3. Торрингтон, Д. Управление человеческими ресурсами / Д. Торрингтон, Л. Холл, С. Тейлор. — 5-е изд. — Москва : Дело и сервис, 2004. — 752 с.

4. Повышение безопасности канатных дорог на основе оценки риска при эвакуации и спасении пассажиров / А. А. Короткий [и др.] // Безопасность труда в промышленности. — 2008. — № 2. — С. 51–58.

5. Короткий, А. А. Экспертиза промышленной безопасности и оценка риска для обоснования безопасности грузоподъемных машин, отработавших нормативный срок службы / А. А. Короткий, В. С. Котельников, В. Б. Маслов // Безопасность труда в промышленности. — 2013. — № 2. — С. 68–74.

6. Короткий, А. А. Влияние высокотемпературных воздействий на риск эксплуатации подъемных канатов / А. А. Короткий, М. Н. Хальфин / Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2013. — № 1–2 (70–71). — С. 112–117.

7. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2013 году [Электронный ресурс] / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору ; ЗАО НТЦ ПБ. — Режим доступа: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/Отчет%202013.pdf (дата обращения 17.02.14).

8. Положение об организации работы по подготовке и аттестации специалистов организаций, поднадзорных Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору (в ред. Приказов Ростехнадзора от 27.08.10 № 823, от 15.12.2011 № 714) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.mspbsng.org/article/584 (дата обращения 17.02.14).

9. О внесении изменений в Положение об организации работы по подготовке и аттестации специалистов организаций, поднадзорных Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору, утвержденное приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 29 января 2007 г. № 37 : Приказ по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) от 6 декабря 2013 г. № 591 [Электронный ресурс] / Ростехнадзор // Рос. газ. — 2014. — № 68. — 26 марта. — Режим доступа: http://www.rg.ru/2014/03/26/rabota-dok.html (дата обращения 17.02.14).

10. Дистанционная подготовка руководителей и специалистов в области промышленной безопасности подъемных сооружений / А. А. Короткий [и др.] // Технадзор. — 2014. — № 3 (88). — С. 16–17.

References

1. O promyshlennoy bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov : feder. zakon № 116-FZ ot 21.07.1997. [On industrial safety of hazardous production facilities: Feder. Law no. 116-FZ of 21.07.1997] Konsul'tant plyus. Available at: www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_173548/ (accessed: 17.02.14) (in Russian).

2. Takala, I., Fraham, Y., Machida, S. Okhrana truda v tsifrakh i faktakh. Napravleniya sovershenstvovaniya global'noy kul'tury okhrany truda. [Occupational safety in facts and figures. Prospects of development of the global labour protection culture.] International Labour Organization. Available at: http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---europe/---ro-geneva/---sro-moscow/documents/genericdocument/wcms_305834.pdf (accessed: 17.02.14) (in Russian).

3. Torrington, D., Hall, L., Taylor, S. Upravlenie chelovecheskimi resursami. [Human Resource Management.] 5th ed. Moscow: Delo i servis, 2004, 752 p. (in Russian).

4. Korotkiy, A. A., et al. Povyshenie bezopasnosti kanatnykh dorog na osnove otsenki riska pri evakuatsii i spasenii passazhirov. [Improving safety of the cable cars on the basis of risk assessment during escape and life saving.] Bezopasnost' truda v promyshlennosti, 2008, no. 2, pp. 51–58 (in Russian).

5. Korotkiy, A. A., Kotelnikov, V. S., Maslov, V. B. Ekspertiza promyshlennoy bezopasnosti i otsenka riska dlya obosnovaniya bezopasnosti gruzopod"emnykh mashin, otrabotavshikh normativnyy srok sluzhby. [Expertise of industrial safety and risk assessment for the safety of overaged hoisting machinery.] Bezopasnost' truda v promyshlennosti, 2013, no. 2, pp. 68–74 (in Russian).

6. Korotkiy, A. A., Khalfin, M. N. Vliyanie vysokotemperaturnykh vozdeystviy na risk ekspluatatsii pod"emnykh kanatov. [High-temperature effect on operation risk of lift cables.] Vestnik of DSTU, 2013, no. 1–2 (70–71), pp. 112–117 (in Russian).

7. Godovoy otchet o deyatel'nosti Federal'noy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru v 2013 godu. [Annual report on the activities of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision in 2013.] Federal'naya sluzhba po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ; [Rostekhnadzor] ZAO NTTs PB. Available at: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/Отчет%202013.pdf (accessed: 17.02.14) .14) (in Russian).

8. Polozhenie ob organizatsii raboty po podgotovke i attestatsii spe-tsialistov organizatsiy, podnadzornykh Federal'noy sluzhbe po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru (v red. Prikazov Rostekhnadzora ot 27.08.10 № 823, ot 15.12.2011 № 714.) [Statement on the organization of training and certification of specialists of the organizations supervised by the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision (as revised in Rostekhnadzor Orders of 27.08.10 no. 823, of 15.12.2011 no. 714)]. Available at: www.mspbsng.org/article/584 (accessed: 17.02.14) (in Russian).

9. O vnesenii izmeneniy v Polozhenie ob organizatsii raboty po podgotovke i attestatsii spetsialistov organizatsiy, podnadzornykh Federal'noy sluzhbe po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru, utverzhdennoe prikazom Federal'noy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 29 yanvarya 2007 g. № 37: Prikaz po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru (Rostekhnadzor) ot 6 dekabrya 2013 g. № 591. [On Amendments to the Regulations on the organization of the training and certification of experts of the organizations supervised by the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision, approved by the order of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision of January 29, 2007 no. 37: Order on the Environmental, Technological and Nuclear Supervision (Rostekhnadzor) of December 6, 2013 no. 591] Rostekhnadzor RG.RU, 2014, no. 68, March, 26. Available at: http://www.rg.ru/2014/03/26/rabota-dok.html (accessed: 17.02.14) (in Russian).

10. Korotkiy, A. A., et al. Distantsionnaya podgotovka rukovoditeley i spetsialistov v oblasti promyshlennoy bezopasnosti pod"emnykh sooruzheniy. [Distance training of managers and specialists in the field of industrial safety of hoisting constructions.] Tekhnadzor, 2014, no. 3 (88), pp. 16–17 (in Russian).

Поступила в редакцию 08.10.2014
Сдана в редакцию 10.10.2014
Запланирована в номер 28.01.2015

БЕЗОПАСНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА
SAFETY OF HUMAN ACTIVITY



УДК 005:378.662 DOI 10.12737/10397

Диагностика системы управления технического университета на основе современных инструментов менеджмента*

Т. В. Симонян[1], Ю. С. Князева[2]**
[1,2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Diagnostics of technical university management system on the basis of modern management tools***

T. V. Simonyan[1], Y. S. Knyazeva[2]**

[1,2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью данной работы является определение сильных и слабых сторон действующей системы менеджмента крупного вуза на примере Донского государственного технического университета. В качестве методов исследования использованы анализ соответствующей научной литературы, проведение полевых исследований, а также обобщение имеющейся актуальной информации о развитии системы менеджмента ДГТУ. Проделанная работа позволила составить полное представление об особенностях информационной кампании, направленной на популяризацию технического образования. Выявлены ее сильные, слабые стороны, риски и возможности. Показаны инструменты влияния на целевую аудиторию. Результаты проведенной диагностики позволили описать проблемное поле исходной коммуникационной ситуации. При этом выявлено важное условие совершенствования информационных процессов: коммуникация должна не просто раскрывать преимущества выбора, но и повышать субъективный уровень безопасности при принятии решений. В сложившихся условиях основным направлением деятельности системы менеджмента технического университета должно стать создание новых конкурентоспособных образовательных услуг.

Ключевые слова: система менеджмента, инструменты менеджмента, коммуникации, технический университет, диагностика системы менеджмента.

The aim of this work is to determine strengths and weaknesses of the current management system of a large university as in the case of the Federal State-Funded Educational Institution of Higher Vocational Education “Don State Technical University” (DSTU). The analysis of the appropriate scientific literature, field studies, and the consolidation of the available relevant information on the development of the DSTU management system are used as the research methods. The work undertaken allows getting the full picture of the information campaign features aimed at the engineering education promotion. Its strengths and weaknesses, risks and opportunities are identified. Tools of influence on the target audience are shown. The results of the diagnostics allow describing the problem field of the initial communication situation. At the same time, an important condition for improving information processes is revealed: the communication should not just show the choice advantages, but also raise the subjective safety level under decision making. The performed work leads to the following conclusion. Under current circumstances, the central focus of the management system of the technical university should be the development of new competitive educational services.

Keywords: management system, management tools, communications, technical university, diagnostics of management system.

Введение. В современных условиях при развитии высшего учебного заведения становится очевидной необходимость повышения эффективности его системы менеджмента. С этой целью создается новая структура внутривузовского взаимодействия, которая предполагает, в первую очередь, усиление горизонтальных информационно-коммуникационных связей между сотрудниками и менеджментом. Кроме того, развивается система качества, ориентирующая образовательный процесс не только на требования стандартов, но и на запросы личности, общества и государства. Образование в техническом университете, безусловно, имеет определенные особенности. Во-первых, следует сказать о высокой степени диверсификации и индивидуализации при подготовке и оказании образовательных услуг. Во-вторых,

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**e-mail: Cimonyan.t@gmail.ru, Knyazeva_dstu@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

необходима комплексная подготовка обучающегося к изменяющимся условиям профессиональной деятельности. В-третьих, учебная и научная деятельность интегрируются в единый научно-образовательный процесс. На современном этапе одним из важнейших направлений развития экономики является переход к инновационному типу развития. При этом отмечается объективное противоречие между требованиями, предъявляемыми обществом к качеству образовательных услуг, и состоянием систем менеджмента университетов.

Диагностика системы управления технического университета на основе современных инструментов менеджмента. Университет находится в непрерывном взаимодействии с внешней средой — происходит обмен информацией, изучаются интересы потенциальных потребителей, привлекаются ресурсы для осуществления деятельности. И только в налаженной системе коммуникационного взаимодействия с внешней средой университет получает финансирование, приобретает опыт, развивает сотрудничество и т. д. для сохранения и укрепления положения университета на рынке следует повышать эффективность этого взаимодействия [1]. С точки зрения управления современное российское высшее учебное заведение может рассматриваться как крупное производственное предприятие. В настоящее время качественное управление университетом невозможно, если система менеджмента не обеспечивает обратную связь — как внутри вуза, так и с внешней средой [2, 3].

Типичный пример такой организации — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донской государственный технический университет» (далее ДГТУ). Для системы менеджмента ДГТУ характерны перечисленные ниже особенности.

1. Деятельность такой организации, как технический университет, предполагает множественность целей. Кроме того, менеджмент данного учреждения работает с системой процессов, объединенных довольно сложными связями. Элементы структуры вуза — структурные подразделения (учебные, научные, хозяйственные, производственные, социальные и пр.) взаимодействуют между собой, а также с организациями вне данной системы.

2. Большое число процессов крупного вуза, их тесные взаимосвязи и, соответственно, множество каналов управления обусловливают многоконтурность системы. Так, процесс обучения традиционно неразрывно связывается с научно-исследовательским процессом. Со всеми направлениями деятельности ДГТУ связаны, например, инновационные процессы и информатизация. Это определяет особенности управления. При его осуществлении необходимо учитывать весь комплекс связей. Грамотное администрирование в данном случае предполагает координацию решений на различных вертикальных и горизонтальных уровнях менеджмента с учетом интересов всех его субъектов.

3. Многие процессы начинаются в рамках структуры управления ДГТУ, а продолжаются и завершаются в других системах. Таким образом, рассматриваемый процесс администрирования не имеет четких локальных или временных границ. Скорее, речь идет о менеджменте распределенной системы. При этом глобальная обратная связь демонстрирует результаты деятельности университета, способствует повышению его научной, культурной и деловой репутации.

4. В процессе управления Донским государственным техническим университетом широко применяются специфические коммуникационные технологии.

Иерархическая структура целей, подцелей и задач, которые должен решать университет в процессе своей деятельности, является основной в построении системы менеджмента.

Реформирование системы менеджмента университета обусловлено следующими задачами:

— привлечение внебюджетных средств и освоение новых подходов к управлению внутренними ресурсами для достижения бесперебойного и достаточного финансирования всех процессов ДГТУ;

— прогнозирование состояния среднесрочной и долгосрочной перспективы развития отечественного рынка труда для постоянной доработки, уточнений и дополнений предлагаемых вузом направлений подготовки (специальностей), а также отдельных дисциплин;

— совершенствование форм основного, дистанционного и дополнительного образования и при необходимости их сочетание для более полного удовлетворения интересов потребителей образовательных услуг, а также запросов рынка труда;

— повышение профессионализма и компетентности управленческих кадров;

— изучение новых технологий в сфере образования и их внедрение с учетом возможностей системы (в случае необходимости их взаимная настройка и адаптация).

Следует отметить, что приоритетным направлением модернизации российской науки является повышение престижа инженерных профессий. Для реализации данной цели необходимо сформировать новое поколение инженеров [4]. Для этого, в первую очередь, нужно ликвидировать существующие пробелы в теории модернизации современного высшего технического образования. Высшее техническое образование может и должно сыграть ключевую роль как в осуществлении процесса становления общества (в частности, его техносферы), так и в решении проблем перспективного развития личности и социальных общественных институтов.

Предварительный анализ показал наличие признаков, свидетельствующих о неэффективном накоплении человеческого капитала в сфере технологического развития. Ниже приводятся некоторые такие индикаторы.

— Выпускники средних школ, получившие высокий балл по ЕГЭ, ориентированы в первую очередь на получение образования в области экономики и управления, затем в гуманитарных областях и только потом в технических.

— Только технические вузы Москвы первого эшелона (к их числу можно отнести, в частности, МИФИ, МГУ, МГТУ им. Баумана, НИУ ВШЭ) способны привлекать выпускников, успешно сдавших ЕГЭ. Большинству технических вузов приходится зачислять абитуриентов, набравших по профильным предметам (математика, физика, информатика) около 60 баллов (это соответствует тройке по старой системе оценки).

— Согласно исследованию, 40 % выпускников технических вузов не планируют работать по специальности. Они ориентированы исключительно на получение диплома престижного вуза и не идут в профессию.

На основе результатов диагностического исследования, проведенного в Ростовской области в мае — июне 2014 года, был составлен анализ исходной коммуникационной ситуации. Программа включала проведение «полевого» исследования в сочетании с «кабинетным» анализом.

В первую очередь определены сильные стороны коммуникационной кампании, направленной на популяризацию технического образования:

— представление о преимуществах технического образования для успеха в любой сфере современной экономики;

— формирование обоймы технических вузов и университетов, которые предлагают программы, развивающие компетенции, необходимые для работы в технологическом бизнесе;

— усиление маркетинговых стратегий ведущих вузов;

— развитие вузами собственных «школьных» проектов, позволяющих поддерживать качество абитуриентов;

— увеличение финансирования науки;

— запрос молодых людей и экспертов на формирование позитивных социальных образцов (новых героев) в общественном пространстве;

— формирование сегмента СМИ, освещающих вопросы науки, технологий, технического образования.

Слабые стороны коммуникационной кампании, направленной на популяризацию технического образования:

— низкое проникновение контента специализированных СМИ в молодежную аудиторию, несформированность мотивов и практик потребления информации;

— отсутствие в молодежной среде представления о взаимосвязях науки, трудоустройства и бизнеса;

— стремление молодых людей к стабильности, гарантиям, отказ от риска на старте карьеры;

— непрестижность научной карьеры (общее мнение о том, что зарплаты в данной сфере низкие, исследования недостаточно финансируются);

— представление об ученых как об энтузиастах, которые жертвуют заработками ради научных интересов;

— недостаточное число примеров для подражания — молодых (30–35 лет) успешных ученых и представителей технологического бизнеса;

— транслируемое экспертами мнение о падении качества образования и, как следствие, снижении ожиданий в отношении потенциала нового поколения;

— непонимание ценности вуза как источника социальных связей.

Возможности коммуникационной кампании, направленной на популяризацию технического образования:

— насыщение информационного пространства сведениями о механизмах реализации успешных карьерных стратегий в науке;

— продвижение лучших вузовских практик;

— разработка и совершенствование карьерных стратегий в науке с учетом мотивов и ценностных установок молодежной аудитории;

— активация влияния на молодежную аудиторию посредством семейных и дружеских связей;

— формирование запроса на потребление информации о новостях науки и технологического бизнеса;

— целостная ценностная модель как условие эмоционального присоединения аудитории.

Риски, связанные с проведением кампании:

— консервативный характер вузовской среды, которая признается экспертами в целом недружественной для формирования культуры исследовательской и предпринимательской деятельности на современном уровне;

— отсутствие методической и информационной поддержки профориентационной деятельности в средней школе;

— закрытость, непубличность ведущих российских технологических компаний для СМИ;

— поддержка СМИ ценностей материального благополучия в ущерб другим ценностям, которые привлекают людей в сферу технологического развития;

— запрос молодежи на карьерную и академическую мобильность, сохраняющаяся популярность отъезда за рубеж как возможной жизненной стратегии;

— представление о том, что успех в науке и технической сфере требует незаурядных способностей;

— отсутствие информации о запросах рынка на специалистов научно-технической направленности;

— низкая медиаграмотность молодых людей.

Результаты проведенной работы позволяют утверждать следующее.

1. Молодежь дезориентирована в пространстве профессионального выбора. Даже те, кто обучается в ведущих технических вузах, не воспринимают в полной мере ценности экономики знаний. Позитивные примеры не получают широкой известности. Сохраняется представление о том, что наука и технологии — это сфера самореализации увлеченных людей, пренебрегающих материальной и финансовой сторонами вопроса. Этими причинами обусловлена сложившаяся ситуация: научная деятельность не воспринимается как средство социального роста. В настоящее время только начинает развиваться коммуникационная инфраструктура, позволяющая формировать установки на реализацию карьерной стратегии в указанных областях.

2. Актуальная информация о состоянии и перспективах развития науки и технологий пока не достигает широкой молодежной аудитории, ориентированной на получение технического образования и карьеру в научно-технической отрасли. При этом у молодых людей не сформированы мотивы и практики потребления такого контента, отсутствует осознанный запрос на его получение. Этот фактор является одним из основных барьеров коммуникационной кампании.

3. Потенциальные потребители образовательных услуг не всегда понимают, как наука монтируется с успешной самореализацией, какие образовательные и карьерные тактики необходимы для успеха в этих сферах.

4. Научно-техническая отрасль явно недостаточно проявляет себя в коммуникационной деятельности, что обусловливает диспаритет в восприятии престижа карьеры в данной области.

5. Школа пока не готова эффективно работать в области профессиональной ориентации. Указанная деятельность в большинстве случаев отнесена к функционалу школьных психологов, имеет слабое методическое и информационное обеспечение. Эту роль может полноценно выполнять только институт семьи.

6. Анализ медиаканалов показал отсутствие сегмента профориентационных СМИ, отмирание традиционных каналов коммуникаций с молодежью, родительской средой, учителями и нехватку новых. Это является одной из причин неэффективного накопления человеческого капитала в сфере инновационного развития.

7. Вузы в основной массе не поддерживают формы внеучебной активности, которые направлены на социализацию студентов, поэтому взаимодействие в рамках кампании со студенческими организациями может быть продуктивно.

Выбирая профессию (или задумываясь о профессиональной переподготовке), потенциальный потребитель образовательных услуг не всегда руководствуется исключительно собственными предпочтениями. Зачастую важное значение имеет внешнее влияние — например, информационной среды, окружения и пр. (рис. 1).



Рис. 1. Факторы, влияющие на выбор направления подготовки высшего образования

Коммуникация должна учитывать следующий важный момент. Поколение, которое сейчас стоит перед выбором будущей профессии, руководствуется кроме прочего мотивом избегания риска. Это означает, что коммуникация

должна не просто раскрывать преимущества выбора, но и повышать субъективный уровень безопасности при принятии решений.

Таким образом, представляя образование в технической сфере как самый надежный выбор, стоит руководствоваться следующими аспектами.

1. Поддержание представления о том, что техническое образование дает преимущество во всех сферах экономики.

2. Развитие тезисов:

— технологии меняют карту профессий, поэтому техническое образование создает преимущественные позиции в долгосрочной перспективе;

— быстрое развитие технологической сферы обеспечивает развитие компании и предоставляет широкие возможности карьерной мобильности.

Следует отметить также, что маркетинг вуза должен учитывать описанные в экономической теории схемы поведения потребителей — присоединение к большинству и противоположная ему модель сноба.

Из особенностей неэкономического характера известна закономерность распространения информации в малых социальных группах через их лидеров [5, 6, 7, 8].

С точки зрения психофизики, представляет интерес закон Вебера, отражающий характер зависимости силы ощущений от интенсивности воздействия на органы чувств. Существует «порог восприятия», т. е. определенная сила сигнала, при которой человек его замечает. По закону Вебера, сила ощущения достигает определенного порогового значения, а затем (с ростом интенсивности раздражителя) увеличивается все медленнее. Иными словами, данный закон доказывает, что «однообразная» кампания, воздействующая на одну и ту же целевую аудиторию, быстро теряет эффективность [9].

Заключение. В сложившейся ситуации популяризация технического образования в молодежной среде требует, в первую очередь, стимулирования осознанного выбора научно-технической деятельности как привлекательной карьерной траектории. В связи с этим необходимо решение нескольких задач:

— преодоление коммуникационных барьеров, затрудняющих восприятие целевого контента;

— ориентирование молодых людей на наиболее перспективные сферы науки и технологий при выборе профессии;

— информирование целевой аудитории о преимуществах образования и карьеры в научно-технической сфере;

— демонстрация продуктивных связей науки и бизнеса в современной экономике;

— повышение субъективного восприятия престижа карьеры в науке;

— создание ценностной основы для выбора молодежью профессиональной деятельности в научно-технологической сфере;

— интеграция студентов, аспирантов и молодых специалистов в информационную среду инновационного сектора (медиаобучение).

Авторы новых подходов к инженерному образованию говорят о необходимости формирования у специалистов компетенций, позволяющих применять полученные знания и умения на практике при создании конкурентоспособной продукции [10].

Итак, на современном этапе развития экономики общество располагает достаточной для реального прогресса суммой фундаментальных и прикладных знаний. При этом создаются и совершенствуются серьезные информационно-коммуникационные ресурсы. Очевидно, что в сложившейся ситуации важнейшим направлением деятельности технических университетов должно стать создание новых конкурентоспособных образовательных услуг.

Библиографический список

1. Месяц, Г. А. Российское инженерное образование. Проблемы и пути трансформации / Г. А. Месяц, Ю. П. Похолков // Инженерное образование. — 2003. — Вып. 1. — С. 5–10.

2. Буланов, Е. В. Методы комплексного информационного обеспечения инновационной деятельности : дис. … канд. эконом. наук / Е. В. Буланов. — Москва, 2002. — 139 с.

3. Управление высшим учебным заведением / под общ. ред. С. Д. Резника, В. М. Филиппова. — Москва : Инфра-М, 2011. — 42 с.

4. Нутеев, В. В. Престиж инженерного образования зависит от инвестиций [Электронный ресурс] / В. В. Нутеев // Аккредитация в образовании. — 2010. — 19 июля. Режим доступа: http://www.akvobr.ru/prestizh_inzhenernogo_obrazovania_zavisit_ot_investicii.html (дата обращения 24.03.15).

5. Кузнецова, И. В. Потребность человека в эмоционально-доверительном общении / И. В. Кузнецова // Психология XXI века: тезисы междунар. межвуз. науч.-практ. студ. конф. — Санкт-Петербург, 1999. — С. 45.

6. Вилюнас, В. К. Психологические механизмы биологической мотивации / В. К. Вилюнас. — Москва : Издательство МГУ, 1986. — 208 с.

7. Ковалев, В. И. Мотивы поведения и деятельности / В. И. Ковалев. — Москва : Инфра-М, 2008. — 232 с.

8. Ефимов, Б. А. Этичные системы предпочтений на потоках потребления / Б. А. Ефимов // Экономика и математические методы. — 1998. — Т. 34, вып. 1, № 1. — С. 114–131.

9. Weber, M. Economy and Society / M. Weber. — Berkeley ; Los Angeles ; London : University of California Press, 1978. — 1632 p.

10. Агранович, Б. Л. Инновационное инженерное образование / Б. Л. Агранович, А. И. Чучалин, М. А. Соловьев // Инженерное образование. — 2003. — Вып. 1. — С. 11–14.

References

1. Mesyats, G. A., Pokholkov, Y. P. Rossiyskoe inzhenernoe obrazovanie. Problemy i puti transformatsii. [Russian engineering education. Problems and ways of transformation.] Engineering Education, 2003, iss. 1, pp. 5–10 (in Russian).

2. Bulanov, E. V. Metody kompleksnogo informatsionnogo obespecheniya innovatsionnoy deyatel'nosti : dis. … kand. ekonom. nauk. [Methods of complex information support of innovation activity: Cand.Sci. (Economics) diss.] Moscow, 2002, 139 p. (in Russian).

3. Reznik, S. D., Filippov, V. M., eds. Upravlenie vysshim uchebnym zavedeniem. [Management of the higher education institution.] Moscow: Infra-M, 2011, 42 p. (in Russian).

4. Nuteyev, V. V. Prestizh inzhenernogo obrazovaniya zavisit ot investitsiy. [Prestige of engineering education depends on investments.] Akkreditatsiya v obrazovanii, 2010, July, 19. Available at:http://www.akvobr.ru/prestizh_inzhenernogo_obrazovania_zavisit_ot_investicii.html (accessed: 24.03.15) (in Russian).

5. Kuznetsova, I. V. Potrebnost' cheloveka v emotsional'no-doveritel'nom obshchenii. [Human need in emotional and confidential communication.] Psikhologiya XXI veka: tezisy mezhdunar. mezhvuz. nauch.-prakt. stud. konf. [Psychology of the XXI century: Abstracts Int. Intercollege. Sci.-Pract. Stud. Conf.] St. Petersburg, 1999, p. 45 (in Russian).

6. Vilyunas, V. K. Psikhologicheskie mekhanizmy biologicheskoy motivatsii. [Psychological mechanisms of biological motivation.] Moscow: Izdatel'stvo MGU, 1986, 208 p. (in Russian).

7. Kovalev, V. I. Motivy povedeniya i deyatel'nosti. [Motives of behavior and activities.] Moscow: Infra-M, 2008, 232 p. (in Russian).

8. Efimov, B. A. Etichnye sistemy predpochteniy na potokakh potrebleniya. [Ethical preference systems on commodity bundles flows.] Economics and Mathematical Methods, 1998, vol. 34, iss. 1, no. 1, pp. 114–131 (in Russian).

9. Weber, M. Economy and Society. Berkeley; Los Angeles; London: University of California Press, 1978, 1632 p.

10. Agranovich, B. L., Chuchalin, A. I., Solovyev, M. A. Innovatsionnoe inzhenernoe obrazovanie. [Innovative engineering education.] Engineering Education, 2003, iss. 1, pp. 11–14 (in Russian).

Поступила в редакцию 03.06.2014
Сдана в редакцию 06.06.2014
Запланирована в номер 28.01.2015

Сведения об авторах

Ансимов, Алексей Александрович ansimow@yandex.ru	Старооскольский технологический институт им. А.А.Угарова (филиал) НИТУ «МИСиС», Россия
Бабичев, Анатолий Прокофьевич, vibrotech@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Болдырева, Анна Александровна, lenivec88@mail.ru	Закрытое акционерное общество «Аэростатика», Россия
Бонилья, Феликс, vbonilla@yahoo.com	Донской государственный технический университет, Россия
Бровер, Андрей Владимирович, brover@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Бровер, Галина Ивановна, brover@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Бурлакова, Виктория Эдуардовна, vburlakova@donstu.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Губанова, Александра Анатольевна, anatoliya81@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Давтян, Давид Борисович, d_davtyan@bk.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Деплов, Дмитрий Алексеевич, dimadeplov@gmail.com	Донской государственный технический университет, Россия
Егельская, Елена Владимировна, Egelskaya72@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Задошенко, Елена Геннадьевна, zadoshenkoq@rambler.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Заковоротный, Вилор Лаврентьевич, vzakovorotny@dstu.edu.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Закируллин, Рустам Сабирович, rustam.zakirullin@gmail.com	Оренбургский государственный университет, Россия
Кем, Александр Юрьевич akem@dstu.edu.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Кирилин, Александр Николаевич, kirilinalexander@mail.ru	Закрытое акционерное общество «Аэростатика», Россия
Кожокару, Виктор Владимирович, kogokary@rambler.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Короткий, Анатолий Аркадьевич, korot@novoch.ru	Донской государственный технический университет, Россия

Князев, Сергей Юрьевич, Донской государственный технический университет,
ksy@donpac.ru Россия
Князева, Юлия Сергеевна, Донской государственный технический университет,
Knyazeva_dstu@mail.ru Россия
Литвин, Анатолий Витальевич, Донской государственный технический университет,
lea_rnd@mail333.com Россия
Лукьянов, Евгений Анатольевич, Донской государственный технический университет,
lea_rnd@mail333.com Россия
Лыков, Евгений Васильевич Донской государственный технический университет, Россия
Меркер, Эдуард Эдгарович, Старооскольский технологический институт им.
merker@inbox.ru А.А.Угарова (филиал) НИТУ «МИСиС», Россия
Могилевская, Надежда Сергеевна, Донской государственный технический университет,
broshka@nm.ru Россия
Мукутадзе, Мурман Александрович, Ростовский государственный университет путей и со-
vm_2@kaf.rgups.ru общения, Россия
Пастухов, Филипп Андреевич, Донской государственный технический университет,
vibrotech@mail.ru Россия
Попов, Михаил Егорович, Донской государственный технический университет,
pme-dgtu@mail.ru Россия
Пожарский, Дмитрий Александрович, Донской государственный технический университет,
pozharda@rambler.ru Россия
Пустовойт, Виктор Николаевич, Донской государственный технический университет,
fipm-dstu@mail.ru Россия
Симонян, Татьяна Владимировна, Донской государственный технический университет,
Cimonyan.t@gmail.ru Россия
Христофорова, Вероника Владимировна, Донской государственный технический университет,
nikaapp@rambler.ru Россия
Шведова, Александра Сергеевна, Донской государственный технический университет,
kazimirovas@mail.ru Россия
Щербакова, Елена Евгеньевна, Донской государственный технический университет,
Sherbakovaee@mail.ru Россия
Эль Дакдуки, Ахмад, Донской государственный технический университет,
vibrotech@mail.ru Россия

INDEX

Ansimov, Alexey Alexandrovich, ansimow@yandex.ru — Stary Oskol Technological Institute after A.A.Ugarov (NITU "MISiS" branch), Russia

Babichev, Anatoly Prokofyevich, vibrotech@mail.ru — Don State Technical University, Russia

Boldyreva, Anna Alexandrovna, lenivec88@mail.ru — ZAO “Aerostatika”, Russia

Bonilla, Felix, vbonilla@yahoo.com — Don State Technical University, Russia

Brover, Andrey Vladimirovich, brover@mail.ru — Don State Technical University, Russia

Brover, Galina Ivanovna, brover@mail.ru — Don State Technical University, Russia

Burlakova, Victoria Eduardovna, vburlakova@donstu.ru — Don State Technical University, Russia

Davtyan, David Borisovich, d_davtyan@bk.ru — Don State Technical University, Russia

Deplov, Dmitry Alexeyevich, dimadeplov@gmail.com — Don State Technical University, Russia

El Dakdouki, Ahmad, vibrotech@mail.ru — Don State Technical University, Russia

Gubanova, Alexandra Anatolyevna, anatoliya81@mail.ru — Don State Technical University, Russia

Kem, Alexander Yuryevich, akem@dstu.edu.ru — Don State Technical University, Russia

Kirillin, Alexander Nikolayevich, kirilinalexander@mail.ru. — ZAO “Aerostatika”, Russia

Khristoforova, Veronika Vladimirovna, nikaapp@rambler.ru — Don State Technical University, Russia

Knyazev, Sergey Yuryevich, ksy@donpac.ru — Don State Technical University, Russia

Knyazeva, Yulia Sergeyevna, Knyazeva_dstu@mail.ru — Don State Technical University, Russia

Korotkiy, Anatoly Arkadyevich, korot@novoch.ru — Don State Technical University, Russia

Kozhokaru, Victor Vladimirovich, kogokary@rambler.ru — Don State Technical University, Russia

Litvin, Anatoly Vitalyevich, lea_rnd@mail333.com — Don State Technical University, Russia

Lukyanov, Evgeny Anatolyevich, Don State Technical University, Russia
lea_rnd@mail333.com
Lykov, Evgeny Vasilyevich Don State Technical University, Russia

Merker, Eduard Edgarovich, Don State Technical University, Russia
merker@inbox.ru
Mogilevskaya, Nadezhda Sergeyevna, Don State Technical University, Russia
broshka@nm.ru
Mukutadze, Murman Alexandrovich, Rostov State Transport University, Russia
vm_2@kaf.rgups.ru
Pastukhov, **Philip Andreyevich**, Don State Technical University, Russia
vibrotech@mail.ru
Popov, Mikhail Egorovich, Don State Technical University, Russia
pme-dgtu@mail.ru
Pozharskiy, Dmitry Alexandrovich, Don State Technical University, Russia
pozharda@rambler.ru
Pustovoyt, Victor Nikolayevich, Don State Technical University, Russia
fipm-dstu@mail.ru
Shcherbakova, Elena Evgenyevna, Don State Technical University, Russia
Sherbakovaee@mail.ru
Simonyan, Tatyana Vladimirovna, Don State Technical University, Russia
Cimonyan.t@gmail.ru
Shvedova, Alexandra Sergeyevna, Don State Technical University, Russia
kazimirovas@mail.ru
Yegelskaya, Elena Vladimirovna, Don State Technical University, Russia
Egelskaya72@mail.ru
Zadoshenko, Elena Gennadyevna, Don State Technical University, Russia
zadoshenkoq@rambler.ru
Zakirullin, Rustam Sabirovich, Orenburg State University, Russia
rustam.zakirullin@gmail.com
Zakovorotny, Vilor Lavrentyevich, Don State Technical University, Russia
vzakovorotny@dstu.edu.ru